

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Postup výstavby trojlodní stanice metra metodou NRTM a ovlivnění
činností štítů EPBS na realizované trase

The Process of Construction of the Three-Aisle Metro Station by the
NATM and influence of the EPBS Activities on the Route

Student:

Bc. Alexandra Svobodová

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lukáš Ďuriš , Ph.D.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Alexandra Svobodová**
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607T035 Geotechnika
Téma: **Postup výstavby trojlodní stanice metra metodou NRTM a ovlivnění činností štítů EPBS na realizované trase**
The Process of Construction of the Three-Aisle Metro Station by the NATM and Influence of the EPBS Activities on the Route

Zásady pro vypracování:

1. Úvod a seznámení s problematikou ražby a ražení stanic metra pomocí NRTM
2. Zhodnocení IG situace stanice metra Nádraží Veveř
3. Postup výstavby trojlodní stanice pomocí NRTM, příprava pro protažení EPBS, ovlivnění následných činností v prostoru stanice technologií EPBS
4. Organizace zásobování a dopravy pro výstavbu ražené stanice v jednotlivých fázích výstavby
5. Použití uzavřené stříkané hydroizolace při výstavbě
6. Závěr a zhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:

Klepsatel, F. a kol. *Městské podzemní stavby*. Bratislava: Jaga Group, 2005, 286 s. ISBN: 80-8076-021-7.
Exner, K. *Ražení důlních děl*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1991, 240 s. ISBN 80-707-8077-0.
Klepsatel, F. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, 2003, 215 s. ISBN 80-889-0543-5.
Odborné časopisy - Tunel, firemní zpravodaje (Subterra), internetové stránky

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2014

Datum odevzdání: 01.12.2014

doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevzdáním své diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o veřejných školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Adresa trvalého pobytu :

Popovice 67

Popovice u Rajhradu, 664 61

Anotace

Postup výstavby trojlodní stanice metra metodou NRTM a ovlivnění činností štítů EPBS na realizované trase

Počet stran: 84 (67 bez přílohové části)

Pražské metro je největší podzemní stavba v České republice. Na postupné realizaci jednotlivých tras lze pozorovat vývoj a zdokonalování technicko-technologických postupů pro řešení geotechnických problémů. Stanice metra Nádraží Veleslavín je další milník ve vývoji podzemních staveb v intravilánu. Jedná se o první trojlodní stanici prováděnou Novou rakouskou tunelovací metodou. Na stavbě bylo realizováno několik inovativních postupů a materiálů. Jednalo se především o postupnou ražbu jednotlivých profilů, stříkanou hydroizolační membránu, přechodové detaily, spárové plechy a monolitické konstrukce velkých dimenzí v podzemí. Ražba byla vedena v nepříznivém inženýrskogeologickém prostředí. Geotechnický problém je prezentován na matematickém modelu

Annotanion

The Process of Construction of the Three-Aisle Metro Station by the NATM and influence of the EPBS Activities on the Route

Number of pages: 84 (67 without attachments)

The prague subway is the largest underground construction in the Czech republic. On the gradual realization of individual metro lines can be observed development and improvement of technical and technology progress for geotechnical problems. The subway station Nádraží Veleslavín is another advance in the progression of underground structures in urban area. It is the first three aisle subway station implemented by the New Austrian tunnel method. On the construction was implemented several innovative processes and materials. These were mainly about gradual excavation individual profiles, spray-applied waterproofing membrane, transition details, feeler sheets, monolithic constructions of large dimensions in underground.. Excavation was conducted in complicated engineering-geological environment. Geotechnical problem is presented on a mathematical model.

Klíčová slova

Trojlodní stanice metra, Nádraží Veleslavín, NRTM, stříkaná hydroizolační membrána

Key words

Three-Aisle Metro Station, Nádraží Veleslavín, NRTM, spray-applied waterproofing membrane

Obsah

Seznam použitého značení	8
1. Úvod	10
2. Úvod a seznámení s problematikou ražby a ražení stanic metra pomocí NRTM	12
2. 1. Vývoj ražby dle NRTM při výstavbě pražského metra	12
2. 2. Počátky využití NRTM na stavbě pražského metra	14
2. 3. Problematika a rizika ražby metodou NRTM	15
2. 4. Základní informace o stavbě	18
2. 5. Seznámení s problematikou ražby stanice Nádraží Veleslavín	19
3. Zhodnocení IG situace stanice metra Nádraží Veleslavín	22
3. 1. Monitoring a prozkoumanost zájmového území	22
3. 2. Inženýrskogeologické podmínky	23
3. 3. Zhodnocení a geotechnická charakteristika	25
4. Postup výstavby trojlodní stanice pomocí NRTM	26
4. 1. Ražba a primární ostění bočních tunelů	27
4. 2. Příprava pro protažení technologie EPBS, ovlivnění činností v prostoru stanice	29
4. 3. Únikový objekt	30
4. 4. Definitivní ostění bočních tunelů	32
4. 5. Ražba a primární ostění středního tunelu	35
4. 6. Definitivní ostění středního výrubu	36
5. Matematický model postupu výstavby	37
5. 1. Úvod k matematickému modelování metodou MKP za využití programu Plaxis	37
5. 2. Numerický model stanice metra Nádraží Veleslavín	38
6. Organizace zásobování a dopravy pro výstavbu ražené stanice v jednotlivých fázích výstavby	52
6. 1. Fáze před započítáním ražby	52
6. 2. Fáze během výstavby bočních tunelů	53
6. 3. Fáze protažení technologie EPBS a její zásobování	54
6. 4. Fáze realizace středního výrubu a dokončení výstavby	55
7. Použití uzavřené stříkané hydroizolace při výstavbě	56
7. 1. Stříkaná hydroizolační membrána v podzemním stavitelství	56
7. 2. Stříkaná hydroizolační membrána MASTERSEAL® 345	57

7. 3. Řešení aplikace technologie na stanici metra Nádraží Veleslavín	58
7. 4. Řešení detailůpřechodových detailů.....	59
8. Závěr a zhodnocení	62
Seznam použité literatury:	65
Přílohová část	68

Seznam použitého značení

kN	kilonewton
m	metry
m^3	metr krychlový
m^2	metr čtverečný
mm	milimetr
MPa	megapascal
NRTM	Nová rakouská tunelovací metoda
PT	pravý tunel
LT	levý tunel
ST	střední tunel
MC	Mohr - Coulomb
PST	pravý staniční tunel
LST	levý staniční tunel
SST	střední staniční tunel
TM	tunelometr
Ø	průměr
KVG	konvergence
TBM	Tunnel Boring Machine
EPBS	Earth-Pressure Balance Shields
PD	projektová dokumentace
SV	severovýchodní

JZ	jihozápadní
GT	geotechnický typ
PE	polyethylen
E	modul pružnosti
E_{def}	modul pružnosti
φ	úhel vnitřního tření
ϕ_{ef}	efektivní úhel vnitřního tření
\emptyset	průměr
c	soudržnost
c_{ef}	efektivní soudržnost
ν	Poissonovo číslo
ψ	úhel dilatance
EA	tlaková tuhost
EI	ohybová tuhost
w	tíha
d	tloušťka
γ	obejmová tíha
σ_r^f	fiktivní radiální napětí
σ_r^0	originální geostatické napětí
β	faktor redukce napětí

1. Úvod

Česká republika se i přes svou poměrně malou rozlohu a morfologické uspořádání řadí mezi státy s vyspělou úrovní podzemního stavitelství. Disponuje velmi rozvinutým a pestrým fondem podzemních objektů různého účelu, typu konstrukce a stářím. Podzemní stavby jsou přímo spjaty s horninovým prostředím, v němž jsou díla budována. Základní faktory ovlivňující realizaci lze shrnout do společného působení technologie, geometrie a geologie s návazností na ekonomii a ekologii.

Nárůst počtu obyvatel naší planety je spojen s vyliďňováním venkova a tedy se zvětšováním se měst a jejich aglomerací. Se zvyšující se koncentrací jsou kladeny zvýšené nároky na technickou infrastrukturu. Při ubývajícím prostoru na povrchu je dovednost využití podzemí nepostradatelným pozitivem. Přináší zkvalitňování městské dopravy, prostor pro individuální dopravu a parkování. Možnost ukrytí inženýrských sítí, které lze však jednoduše kontrolovat a v neposlední řadě lze do podzemí umísťovat prostory pro rekreačně - sportovní využití obyvatelstva.

Největší podzemní stavbou v České republice je pražské metro. Výstavba nejen metra, ale i jiných městských podzemních staveb přinášejí 3. úroveň města k umísťování staveb veřejného zájmu. Je to přirozený vývoj rozrůstání měst a městských aglomerací, spolu se zvyšujícími se nároky na ekologii. První návrhy pražského metra pochází z roku 1926. Skutečná realizace započala v 60. letech 20.století a postupná výstavba a prodlužování úseků trvá po současnost. Předpokládá se realizace nové trasy, kdy v budoucnu se s největší pravděpodobností připojí k nynějším trasám A, B, C i trasa D.

Na postupu výstavby trojlodní stanice metra Veleslavín, nacházející se na prodlouženém úseku metra A (provozní úsek V. A), lze pozorovat výsledek dekád přirozeného vývoje podzemního stavitelství v ČR. Bez pochyb se jedná unikátní a technicky náročné dílo, kde bylo použito mnoho inovativních řešení.

Dílo bylo náročné nejen na výstavbu a technologie, ale také na organizaci a zvládnutí termínů. Na postupu lze pozorovat variabilitu řešení, které musí být neustále přizpůsobováno nastalé situaci. K zvládnutí celého problému postupu výstavby je mnoho klíčových faktorů. Mohou jimi být technicko - technologické požadavky na zvládnutí situace postupu výstavby, příprava, využití zkušenosti z výstavby podobných děl, organizace, realizace, včasné reakce na změnu prostředí pro stavbu nebo legislativní náročnost. Tato diplomová práce si klade za cíl obeznámit se s unikátní výstavbou stanice metra Veleslavín, prezentující jeden z článků vývoje podzemního stavitelství v ČR, a zhodnocení postupu, technologii a možnost využití znalostí do budoucích projektů. Pro realistické zhodnocení postupu byla v práci vytvořena modelová situace výstavby prezentující chování geotechnického problému.

2. Úvod a seznámení s problematikou ražby a ražení stanic metra pomocí NRTM

Progrese Nové rakouské tunelovací metody nastala především v 90. letech, kdy došlo k podstatným politickým a hospodářským změnám zapříčiněným změnou režimu. „Pro české tunelářství se stala symbolem dějinné změny NRTM.“[1] Od 90. let nastalo takřka výhradní zaujetí touto metodou, což znamenalo útlum především plnoprofilových tunelovacích strojů. Důvody pro preferování této metody byli zřejmě ekonomicko-hospodářské (krátké tunely a vysoké investiční náklady do tunelovacích strojů). Poslední trendy výstavby však ukazují, že ideální kombinací pro dosažení hospodářsky - ekonomických cílů v podzemním stavitelství je skloubení cyklické ražby pomocí NRTM a moderní kontinuální ražby technologií plnoprofilových tunelovacích strojů. Je to především dáno limity použitelnosti NRTM. [1] [2]

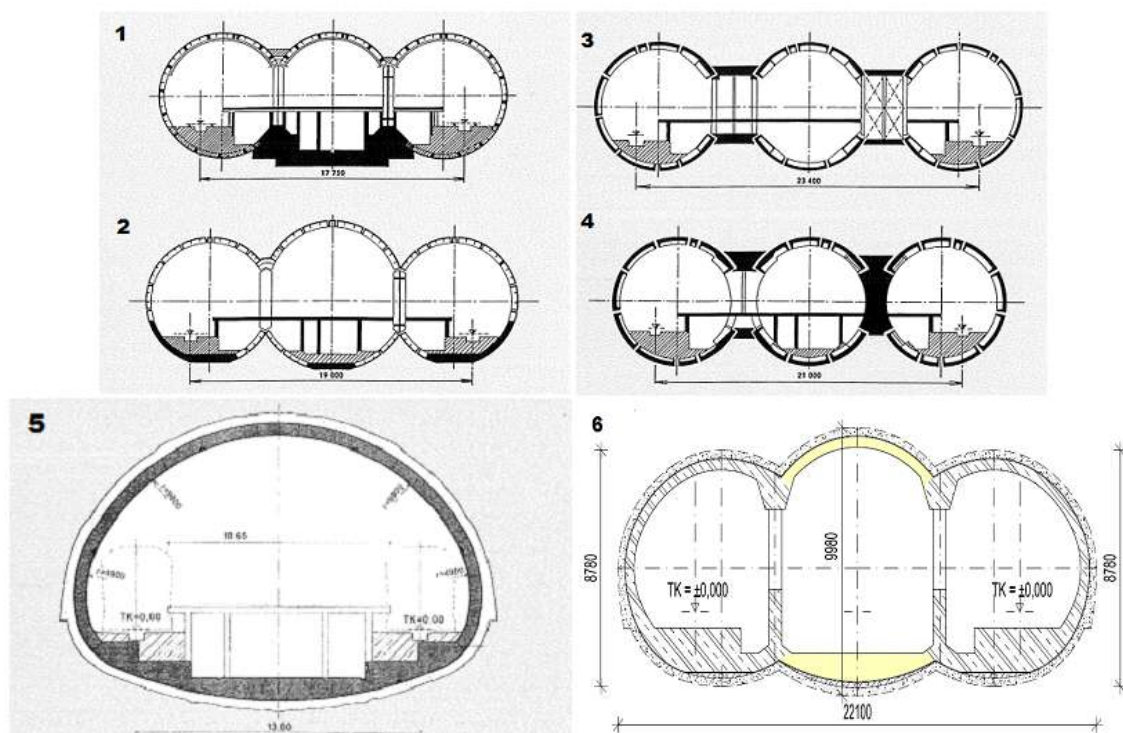
2. 1. Vývoj ražby dle NRTM při výstavbě pražského metra

K realizaci pražského metra bylo přistoupeno v 60. letech 20. století z důvodů nedostačující dopravní obslužnosti a to i v hromadné přepravě osob. Metro je nenahraditelným článkem pražské veřejné dopravy. Systém sítě tras lze označit jako radiální[8] - vzhledem ke své délce a spojení okrajových částí města a centra, kde ovšem zajišťuje dopravu diagonálním systémem.

Variabilita pražského geologického prostředí s vodonosnými vltavskými terasami a střídajícími se měkkými a tvrdými ordovickými horninami může mít jistá omezení v rámci využití metody NRTM. (více kapitola 2.2). Starší úseky metra, především do roku 1989, jsou raženy prstencovou (erektorovou) metodou. Ostění bylo tvořeno segmentovými dílci-železobetonovými nebo litinovými tybinky. Štitování se používalo mechanizované i nemechanizované. I přes ovlivňování výstavby použitím strojů a technologií ze Sovětského svazu docházelo k jistým snahám o vlastní vývoj podzemního stavitelství. [1] [3]

Po roce 1989 začali tuneláři využívat aplikaci NRTM, možná z části na úkor plnoprofilového ražení. Na IV. provozním úseku trasy B byla poprvé využita metoda NRTM úsek: Kolbenova-Hloubětín. Vývoj metody v ČR zdokonaloval a rozvíjel technologie a postupy používané v podzemním stavitelství, především v oblasti zajišťování výrubu, stabilizace nadloží. V průběhu vývoje dochází ke zkvalitnění stříkaného betonu, zdokonalení stabilizačních opatření, zvládnutí členěné čelby a zvyšujícím se technickým výzvám. [3] Vývoj příčného profilu stanic postupoval od trojlodní stanice sloupové, sloupové s rozšířeným středovým tunelem přes pilířovou stanici s železobetonovým ostěním a zmenšenými pilíři k jednolodním stanicím řešenými metodou NRTM. (Obr. 1.) Dále je možno stanice dělit dle různých kritérií: polohy nástupišť, počtu vestibulů, funkce v síti metra, nebo polohy vůči terénu (povrchové, podzemní hloubené, podzemní ražené.) [2] [3]

Stanice metra Veleslavín je první trojlodní stanicí pražského metra, která je navržena realizací NRTM v rámci prodloužení trasy metra A v Praze.



Obr. 1. Vývoj příčného profilu na trasách pražského metra: 1) sloupová stanice na trase A (Můstek), 2) sloupová na trase B s rozšířeným středním tunelem, 3) pilířová stanice se železobetonovým ostěním a pilíři na trase A (Hradčanská, Náměstí Míru), 4) pilířová stanice na trase B se zmenšenými pilíři, 5) jednolodní stanice Kobyličky na trase C, 6) trojlodní stanice Nádraží Veleslavín zdroj: [3] [10]

2. 2. Počátky využití NRTM na stavbě pražského metra

První pokusy využití NRTM se promítly do výstavby IV. provozního úseku trasy B. Konkrétně na jednokolejných traťových tunelech na úseku Kolbenova - Hloubětín. Při realizaci bylo zjištěno, že jednokolené profily jsou pro náročné mechanismy a technologie malé na to, aby se střídaly na čelbě. Tedy první poznatky vedoucí k vývoji úprav ražby NRTM v prostředí českého podzemního stavitelství.

Jako významný milník pro využití NRTM je označováno částečné nahrazení dvou jednokolejných tunelů, v traťovém úseku, dvojkolejným v délce 612 m (úsek Hloubětín - Rajská zahrada)[4]. Metroprojekt Praha a.s. zde navrhl jednolodní profil, odpovídající výrubem dvěma jednokolejným tunelům s velmi plochou klenbou. I přes negativní ohlasy splnil příčný profil předpoklady návrhu a byl uplatněn i na dalších úsecích.

Posléze bylo přistoupeno také k ražbě eskalátorových tunelů, které byly do doby využívání NRTM označovány jako jedny z nejobtížnějších tunelových objektů. Technika ražby metodou NRTM ovládla i tyto objekty a výsledky těchto náročných ražeb byly označovány jako víc než uspokojivé.

Postupným zvládnutím a ověřením technicko-technologických postupů nové metody bylo nakonec docíleno stavby stanice Kobylisy (Obr. č. 2), která je první ražená jednolodní stanice pražského metra prováděna metodou NRTM. Délka staničního tunelu byla 147,9 m o ploše výrubu 228 m^2 a šířce 21 m. Stanice se razila dílčími výrubu s kombinovaný členěním vertikálním i horizontálním. Důvody tohoto řešení byly dány především velikostí výrubu, nepříznivými inženýrsko - geologickými podmínkami a umístění stavby v intravilánu. [5]



Obr. 2. Vlevo detail prostupu jednokolejného a eskalátorového tunelu do čela staničního tunelu, vpravo členěný výrub stanice Kobylisy, zdroj: [5]

Od počátku 90. let byla v ČR preferována tato metoda, ovšem zkušenosti potvrdily, že při výstavbě pražského metra je důležité kombinovat plnoprofilové ražení s NRTM z důvodů optimalizace výstavby. Stanice Nádraží Veleslavín je ideálním příkladem této kombinace

2. 3. Problematika a rizika ražby metodou NRTM

„Základní rizika, která lze při výstavbě podzemních objektů identifikovat, lze rozdělit na rizika plynoucí z geologického prostředí a rizika, která lze označit jako technologická“ [2]. V případě ražby stanice Nádraží Veleslavín se jednalo o kombinaci těchto dvou problematik. „Rizika při ražbě tunelů nikdy nelze vyloučit. Pracuje se v přírodním prostředí, jehož vlastnosti a chování nelze nikdy dopředu stanovit, vždy se jedná jen o prognózu, kterou teprve ražba definitivně upřesní.“ [2] Při výstavbě podzemních staveb může nastat řada problému, které lze zobecnit do těchto bodů:

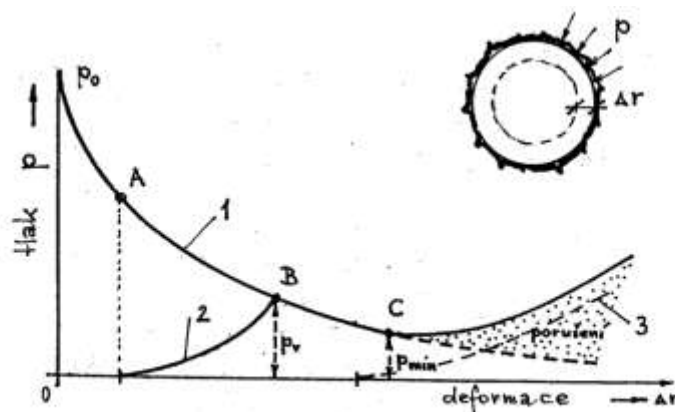
- špatná prognóza geologických poměrů
- odlišné mechanické vlastnosti hornin předpokládané průzkumem
- vodní režim, popřípadě neobvyklá dotace srážek a následná degradace pevnostních a přetvárných vlastností
- nepředpokládaná napětí-o-deformační odezva horninového masivu

- geodynamické procesy a stupeň zvětrání
- neočekávané kaverny a podzemní dutiny
- následky na životní prostředí

Hlavním principem zvolené technologie ražby pomocí NRTM je využití nosných vlastností horninového masivu, díky kterým lze hospodárně zabezpečovat výrub. Stabilita výrubu je zajišťována primárním ostěním, které společně s horninovým masivem tvoří nosný systém přenášející zatížení (napětí) z provedeného výrubu. Po ustálení napětí - deformačního stavu v okolí výrubu je budováno definitivní (sekundární) ostění. [25] Pro optimalizaci celkového postupu se zavádí geotechnický monitoring pro tzv. observační metodu výstavby, kdy je její průběh sledován a upravován dle chování výrubu a operativně přizpůsoben postup výstavby.

Základním požadavkem v kombinaci s náročným geologickým prostředím je využít krátkodobé stability výrubu a co nejdříve jej zajistit uzavřeným poddajným ostěním. Zabrání se tak rozvolňování masivu a s ním spojeným vznikem dvojosé napjatosti, která je pro ražení tunelu nežádoucí. Ideou je zároveň ponechat masiv určitému procentu přetvoření, čímž se vyvaruje velkým koncentracím napětí v oblasti okolo výrubu. V podstatě se jedná o technicky bezpečný průběh a hospodárnost řízení postupu přerozdělování napětí (z primární na sekundární napjatost), pro dosažení je využito správné volby maximálních deformací. [6] [7]

Průběh radiálního napětí na líci výrubu nazýváme charakteristická křivka horniny a průběh nárůstu pevnosti výstroje křivkou odporu výztuže. Metod k výpočtu této křivky je mnoho, liší se vstupními předpoklady. Jako základ je však považován starý tunelářský poznatek, že se tlak na výstroj zmenší, když se výstroj popustí. Graficky vyjádřeno Fenner-Pacherovou křivkou. [6] [25]



Obr. 3. Fenner-Pacherova křivka: 1) křivka reakce horninového masivu (Fenner-Pacherova křivka) 2) křivka odporu včas zabudované výstroje 3) křivka odporu pozdě zabudované a příliš poddajné výstroje, A - proběhnuté deformace, B - rovnovážný stav křivky, C - pozdní instalace, zdroj: [25]

Ovlivňující limity NRTM jsou dány především v nízkém nadloží, nepříznivých inženýrsko - geologických podmínkách, kdy nízká kvalita horninového prostředí ohrožuje využití základních principů a geomechanického pojetí metody. Zhoršujícím faktorem je také degradace pevnostních parametrů, ovlivňující chování prostředí, vlivem podzemní vody.

Z technologického hlediska probíhá ražení cyklickým postupem, při němž jsou opakovány operace, které v souhrnu svého cyklu umožní postup o jeden pracovní záběr. Výrub je stříkaným betonem doplněn o příhradové nosníky a výztužné sítě, nebo také i o radiální kotvy. Spřažení výstroje výrubu s horninovým masivem probíhá díky soudržnosti líce výrubu se stříkaným betonem a kotevním systémem, který zlepšuje vlastnosti masivu. Soudržnost líce se projevuje při zaplnění trhlin a puklin cementovou maltou, dojde tak k zpevnění vrstvy horniny spolupracující s betonovou vrstvou. Jako doplňková opatření pro zajištění dostatečné stability se využívá různých typů kotvení a jehlování [6] [7] [8] [25]

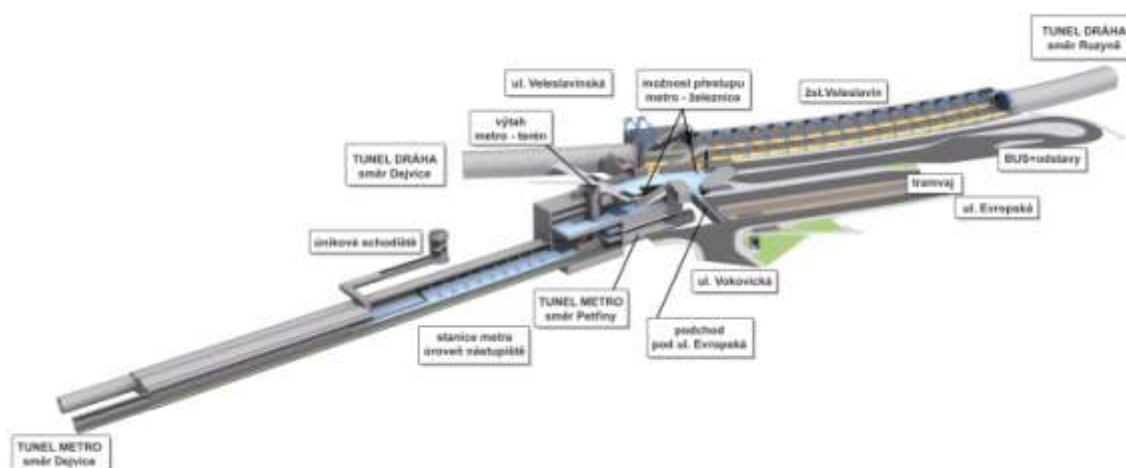
2. 4. Základní informace o stavbě

Stanice metra Nádraží Veveslavín je umístěna šikmo pod ulici Evropská, Praha 6 v místě křižovatky s ulicí Vokovickou a Veveslavínskou. Stavba je součástí nové části prodlouženého úseku pražského metra V. A, kdy jsou budovány čtyři nové stanice metra, z toho tři ražené a jedna hloubená stanice. Jedná se především o stanice jednolodní s výjimkou stanice Nádraží Veveslavín - trojlodní. Nový provozní úsek by měl přispět k celkovému zkvalitnění dopravního systému. Stavba by měla přinést zlepšení organizace dopravy v SZ sektoru Prahy a okolí, jak na místní tak i regionální úrovni. V budoucnu zde bude vytvořeno přestupní místo pro městskou, železniční a autobusovou dopravu. Dle předpokladů by měli cestující ušetřit až 10 minut při přestupu na metro ve stanici Nádraží Veveslavín [26]. Výstavba započala v roce 2009 a zprovozněna pro cestující má být v dubnu 2015.



Obr. 4. Situace stanice metra Nádraží Veveslavín, zdroj: [16]

Dispozičně je stanice dělena horizontálně na hloubenou přístupovou část, pro cestující tzv. podchod, a vestibul, propojující pomocí eskalátorů nejnížší úroveň a to nástupiště. Vestibul se nachází v ražené části a měl by v budoucnu být využit jako přestupní místo na ostatní přidružené stupně dopravy a zpřístupňovat parkoviště pro osobní automobily.



Obr. 5. Stanice Veleslavín dle DVZ, zdroj: [16]

Stavební dílo je tedy mělce ražený trojlodní výrub s délkou 100 m, s přidruženou hloubenou přístupovou částí, s rozšířením pro technologické zázemí. Součástí ražby je také únikový objekt ústící do hloubené šachty. Nástupiště je uloženo 19,3 m pod terénem s osovou vzdáleností kolejí 15 m. Postup výstavby stanice byl vázán na kontinuální ražbu probíhající v traťových úsecích. Možnost přerušení kontinuální ražby nebylo ekonomicko - hospodářsky výhodné a i proto byl proces výstavby úzce svázán a ovlivňován s časovým harmonogramem navazujících technologií.

2. 5. Seznámení s problematikou ražby stanice Nádraží Veleslavín

Jak již bylo zmíněno, základní rizika plynou z geologické situace nebo z technologického postupu. V neposlední řadě bych zde připojila i rizika plynoucí z legislativních procesů. Obecně nejlepších výsledků v používání NRTM dosahují země, které nejen mají dostatečné zkušenosti s touto technologií, ale jejich právní systém umožňuje úpravu provádění. Jejich smluvní vztahy dovolují provádět, oceňovat a odměňovat operativní změny během ražby. Samozřejmě odborná úroveň všech subjektů je nedílnou součástí úspěšné a efektivní realizace. [2]

V souvislosti s geotechnickými vlastnostmi zájmového území byl pro stavební objekt stanice metra Nádraží Veleslavín v našich podmínkách nestandardně zvolen trojlodní profil se sloupy. V případě použití jednolodního profilu by v daných podmínkách nebylo možné dodržet základní principy NRTM, čili dosažení ustáleného napětí - deformačního stavu v okolí výrubu a využití nosných vlastností horninového masivu. Materiály, nacházející se nad výrubem, by nebyly schopny plnit svou funkci horninové klenby, jedná se o břidlice různého stádia zvětrání, kvartérní usazeniny a navážky. [10] [11] Při zvýšené dotaci vody dochází k degradaci pevnostních a přetvárných vlastností. Hlavní identifikace rizik ražby stanice Nádraží Veleslavín:

- inženýrskogeologické poměry v dané lokalitě
- ztráta stability tunelového portálu
- nízké nadloží a nízká kvalita horninového prostředí, nepříznivý sklon diskontinuit, výška nadloží, míra zvětrání polohy břidlic
- lokalizace díla v intravilánu a sním spojené nadměrné poklesy povrchu, seismické účinky a jejich vliv na nadzemní zástavbu nebo inž. síť
- technická náročnost, nové detaily, inovativní přístup - nevyzkoušený
- časový harmonogram navazující na realizaci celé trasy a ovlivňující lokální průběh výstavby
- legislativní procesy (právní uvolnění pozemků)
- časová náročnost přeložek inž. sítí

Většinu geotechnických rizik je možno eliminovat dostatečnou identifikací a přípravou výstavby, monitoringem, ale také i operativním přístupem k vzniklým problémům. Celá výstavba stanice byla vázána na časový harmonogram navazujících technologií v trase, který v tomto případě výrazně změnil průběh výstavby stanice metra Nádraží Veleslavín (nutnost dodržení harmonogramu trasy na úkor stanice). Jednalo se především o tyto nejvýraznější změny:

- zkrácení ražené části dle NRTM o 72 m a navazující přesun technologické části do prostoru hloubené jámy (z důvodů nedodržení termínu počátku výstavby a nepříznivé ražby). Místo chybějící technologické části bylo nahrazeno traťovými tunely již raženými pomocí metody EPBS.

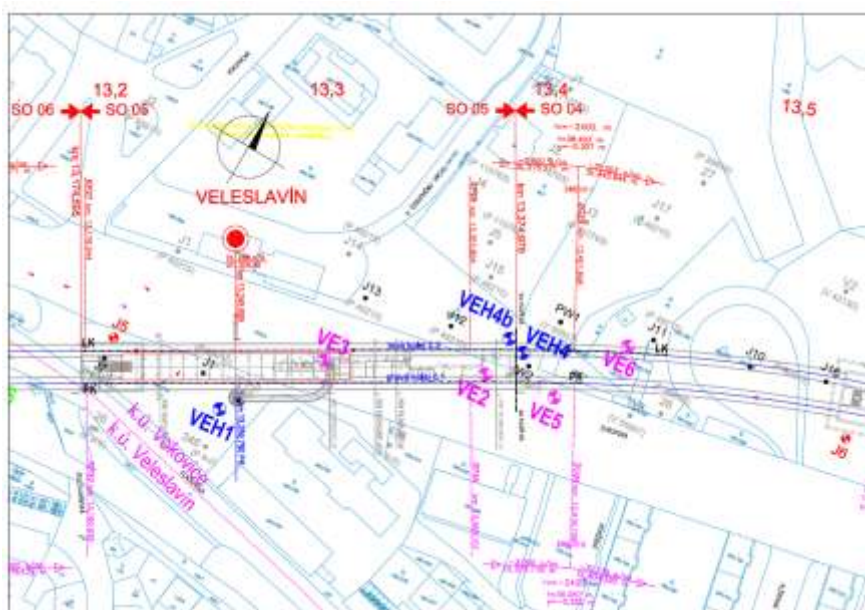
- ražení středního tunelu společně s výstavbou sekundárního ostění bočních výrubů
- svislá doprava rubaniny, materiálu, osob a strojů
- rozdělení nanášení hydroizolačního souvrství (rozděleno na dva celky, které bylo nutno propojit)

3. Zhodnocení IG situace stanice metra Nádraží Veleslavín

3. 1. Monitoring a prozkoumanost zájmového území

Prozkoumanost celého území byla v době zahájení přípravných prací omezena rozsahem průzkumu, který byl zadán objednavatelem. I z těchto důvodů byl proveden na základě domluvy zhotovitele a objednavatele doplňkový inženýrsko - geologický průzkum. Výsledkem bylo upřesnění předpokládaných podmínek.

V rámci stanice bylo realizováno 7 jádrových vrtů, z nichž byly 3 hydrogeologicky vystrojeny PE pažnicí. Umístění bylo omezeno především možnostmi realizace z povrchu. V rámci průzkumu zde byly aplikovány vrtné práce, kdy byly odebrány zeminy i horniny pro laboratorní zkoušky. Na vzorcích byly provedeny petrografické zkoušky. Pro zjištění informací o deformačním chování hornin byly ve vrtech provedeny presiometrické zkoušky. Voda byla odebrána z vrtů, na rozbor pro stavební účely a ve vystrojených vrtech byly dále provedeny také hydrodynamické zkoušky a karotážní měření pro zjištění hydrogeologických parametrů. [11]

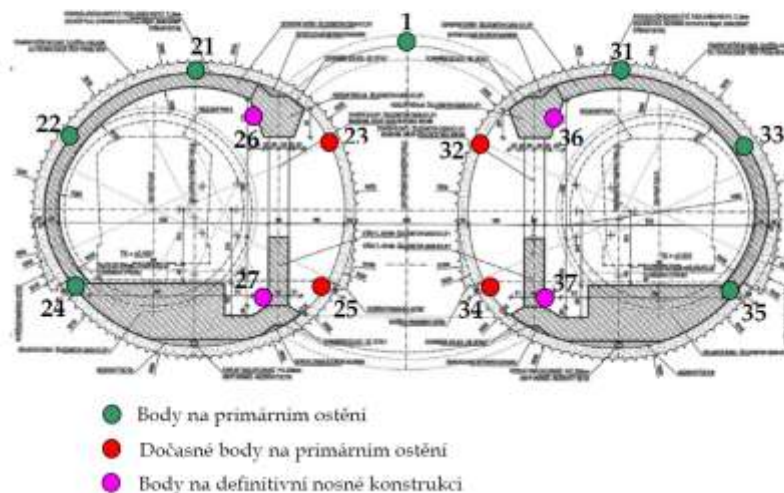


Obr. 6. Situace průzkumných vrtů, zdroj: [11]

Výsledky byly dále upřesněny komplexním hydrogeomonitoringem a geomonitoringem v principu observační metody pro operativní adaptaci projektového nebo technologického řešení v průběhu výstavby, případně možné změny v rozsahu a metodice geotechnického monitoringu.

SO 05-20 – Stanice Veleslavín - rozmístění KVG bodů v příčném řezu části nástupiště – 1. a 2. dílčí výrub, ražba levého a pravého tunelu v délce 95,4 m – KVG profily č. 0505001 až 0505016

Rozmístění KVG bodů bude provedeno dle následujícího schématu:



Obr. 7. Rozmístění KVG bodů, zdroj: [12]

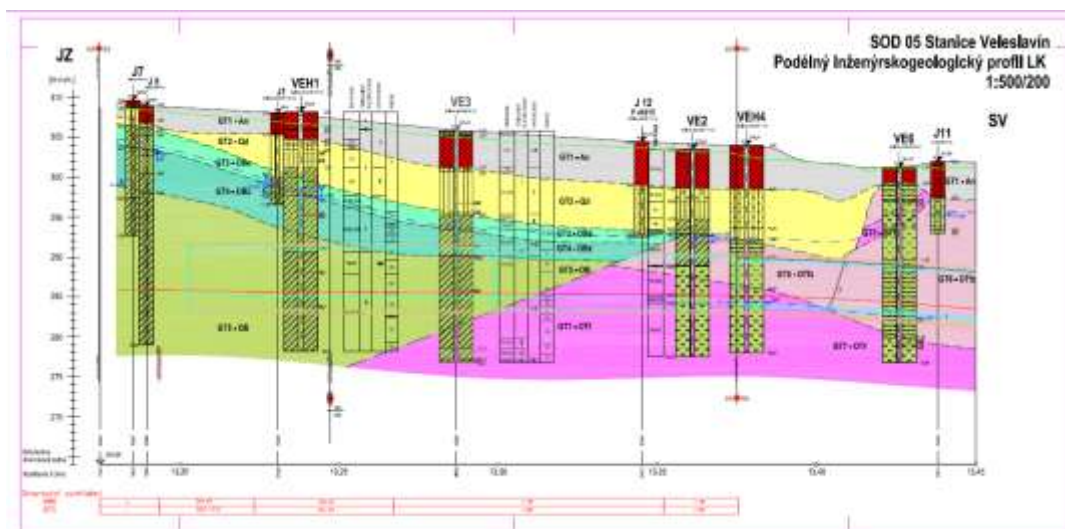
3. 2. Inženýrskogeologické podmínky

Ze závěrečné zprávy doplňkového inženýrsko-geologického průzkumu vyplývá, že pro posouzení byly použity jak získané hodnoty, tak i archivní práce buď realizované, nebo nashromážděné v předchozích průzkumech. Výsledkem doplňkového průzkumu bylo nejen upřesnění průběhu skalního rozhraní a kvartérního pokryvu, ale i dalších inženýrsko-geologických a geotechnických informací pro dokončení dokumentace pro provedení stavby.

Celkové IG poměry jsou zde hodnoceny jako složité a pro ražbu trojlodní stanice výrazně nepříznivé. Základním negativním prvkem je zde kombinace frekventované

komunikace s tramvajovým pásem, nízké nadloží, nízká kvalita masivu a úroveň hladiny podzemní vody.

Geologické poměry jsou nesourodé. Svrchní část zájmového území je tvořena antropogenními navážkami (značeno jako GT1 – An) o mocnosti do 5,5 m, pod kterými se nachází kvartérní sedimenty deluviální a eolicko-eluviální o mocnosti 3,5 - 6,8 m (značeno jako GT2-Qd). Předkvartérní podloží je budováno ordovickými sedimenty šáreckého souvrství, které se obecně vyznačují jako zvrásněný, vrstevnatý komplex, který byl v zájmovém území dokumentován jako monoklinálně ukloněný. [12] Jedná se především o tmavé jílovitoprachovité břidlice různého stupně zvětrání (značeno jako GT3-OB_e, GT4-OB_z, GT5-OB). V závěrečné části na SV straně pak byli prokázány polohy tufů zvětralých až zdravých (GT6-OT_{fz}, GT7-OT_f). Tektonické poruchy byly předpokládány v SV části, ovšem objevily se i při JZ straně.



Obr. 8. Podélný inženýrsko-geologický profil, zdroj: [11]

Dílo se nachází pod hladinou podzemní vody s možnými přítoky do 1 l/min/1m. Agresivita podzemní vody byla vyhodnocena dle ČSN EN 206 - 1 jako XA1 - slabá síranová voda. [11]

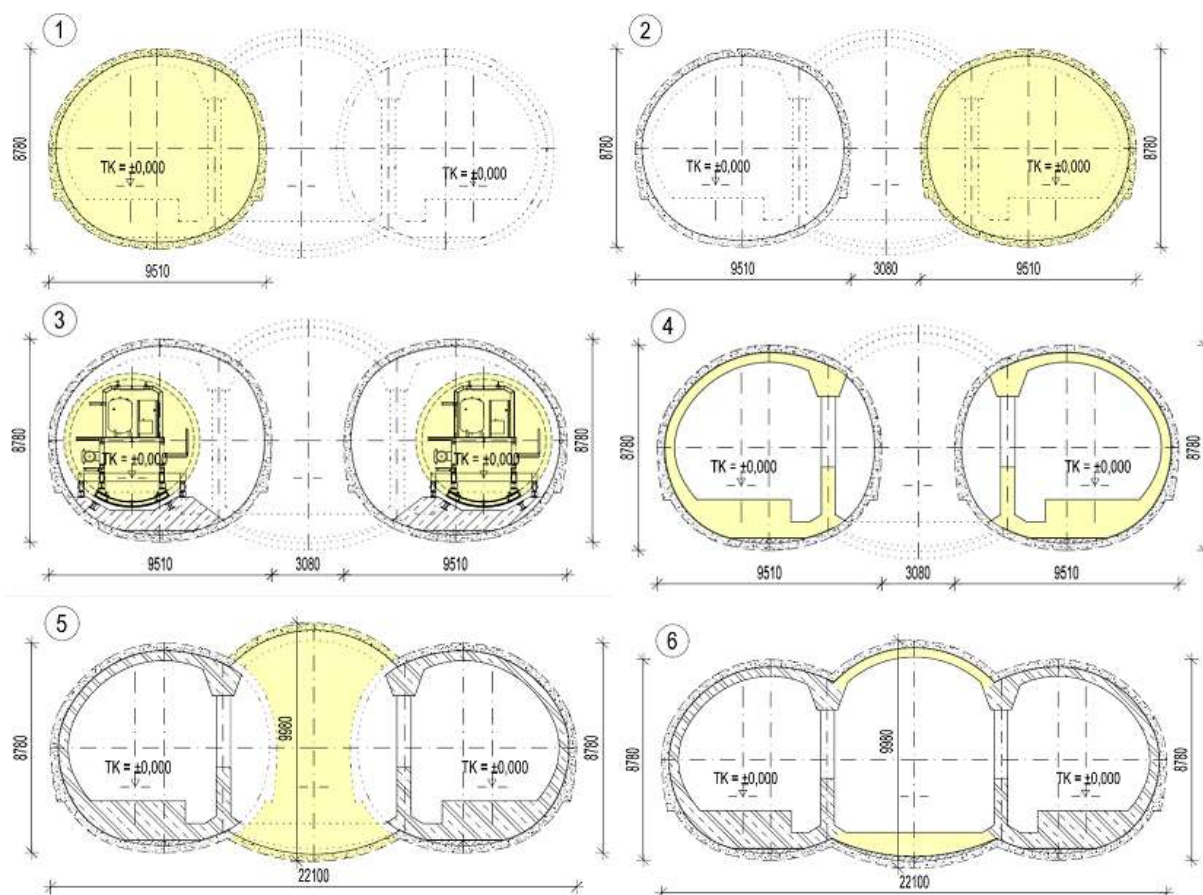
3. 3. Zhodnocení a geotechnická charakteristika

Prostředí výstavby bylo charakterizováno do sedmi základních geotechnických typů hornin a zemin. Značených jako GT1 - GT7 s odpovídající příponou (viz str. 22). Ražba metodou NRTM probíhala především v břidlicích a k SZ straně v tufech různého stupně zvětrání. Jednalo se z větší části o břidlice zvětralé až zdravé, které byly charakterizovány nízkou až velmi nízkou pevností, okrajově s možnou střední pevností. V severovýchodní části se pak nacházely tufy zvětralé až zdravé. [11]

Celkové geotechnické podmínky byly v rámci doplňkového průzkumu prokázány jako složitější, než byly předpokládány v předchozích etapách průzkumu. Faktory ovlivňující nejvíce mechanické vlastnosti horninového masivu je horninový materiál, systém ploch nespojitostí (orientace, vzdálenost, průběžnost atd.), které lze pouze předpokládat na základě monitoringu, zkušenosti a obecných zákonitostí. Od začátku bylo jasné, že charakter stavby měl předpoklad k reálným rizikům, která vyžadují dodatečná opatření. Především se jednalo o zajištění stability čelby, snížení deformací na povrchu a omezení nadvýlomu. Pro toto zatížení se na díle využilo především svorníkové výztuže nebo výztuže ze stříkaného betonu, jejíž přednosti jsou v kombinaci účinků podpěrných neboli nosných, stabilizačních a zpevňujících[6]. Praxe již dříve ověřila stabilizační a statické účinnosti svorníků v náročných geologických podmínkách, kdy svorník při plnění stabilizační a zpevňovací funkce zvyšuje normálová napětí na plochách trhlin a tím vlastně zvyšuje smykové pevnosti horninového prostředí. Při realizaci stavby byly firmou Arcadis a.s. negovány jakékoli změny a zastižená geologie byla platná tak, jak bylo určeno doplňkovým průzkumem. Na základě těchto informací lze konstatovat z pohledu autorky, že návrhy výztuže byly dimenzovány na zastižené geotechnické prostředí. Při dostatečném zajištění výrubu, odvodnění a dodržení předepsaných postupů bylo toto prostředí geotechnicky zvládnutelné.

4. Postup výstavby trojlodní stanice pomocí NRTM

Konečný postup výstavby byl ovlivňován mnoha faktory a proběhlo zde mnoho změn, které byly důkladně zhodnoceny všemi zainteresovanými osobami. Cílem byl průnik ekonomických, realizačních a časových zájmů stavby. Diplomová práce je věnována především postupu výstavby, která bude prezentována na matematickém modelu průběhu ražeb. Varianty a nerealizované koncepce zde nebudou blíže specifikovány.



Obr. 9. Postup výstavby, zdroj: [10]

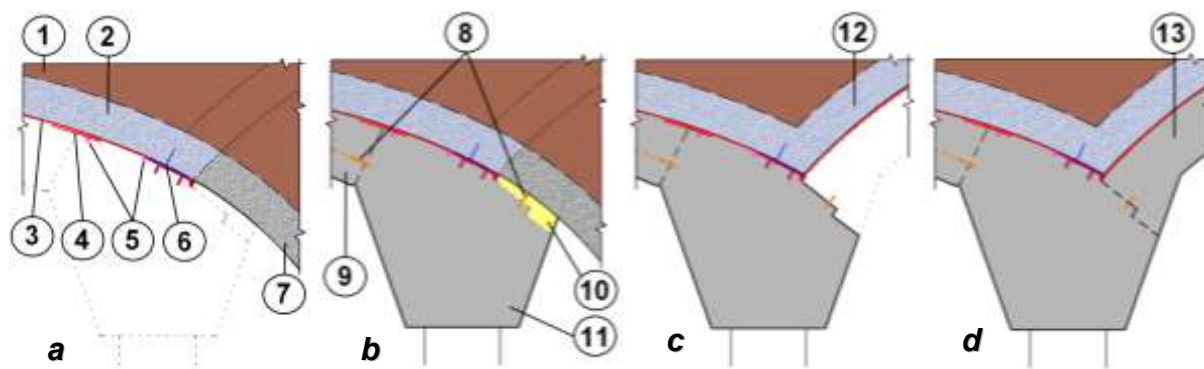
4. 1. Ražba a primární ostění bočních tunelů

Ražba levého staničního tunelu (LST) započala s dvouměsíčním časovým zpožděním začátkem srpna 2011. O zhruba měsíc později byla započata ražba pravého staničního tunelu (PST). Rychlost postupu ražby se pohyboval v rozmezí 1-2m/24h. Výrub byl členěn horizontálně na kalotu a dno. V úvodu byl realizován mikropilotový deštník délky 15 m. Ostění bylo provedeno betonem C20/25, tl. 300 mm, obsahující dvě vrstvy ocelových sítí a příhradové ocelové nosníky BTX (oblouky). Bylo zde provedeno radiální kotvení samozávrtnými injektovatelnými svorníky délky 4 a 6 m. Předpolí ražby kaloty bylo zajištěno obrysovým jehlováním samozávrtnými injektovatelnými jehlami délky 4 a 6 m (44ks/záběr). Stabilita čelby byla podporována sklolaminátovými samozávrtnými injektovatelnými svorníky délky 8 m. V každém druhém záběru byly svorníky aktivovány zálivkou v celé délce tyče. Pro snadnější zmáhání středního výrubu byly kotevní prvky směřující do prostoru navrhovány jako sklolaminátové a v místech zhoršených geologických podmínek byli aktivovány chemickou injektáží. Při zhoršení geotechnických podmínek byly jehly a svorníky aktivovány chemickou injektáží. [14-16]



Obr. 10. Pohled na levý portál a vpravo pohled na čelbu levého tunelu, zdroj:fotoarchiv Subterra.a.s.

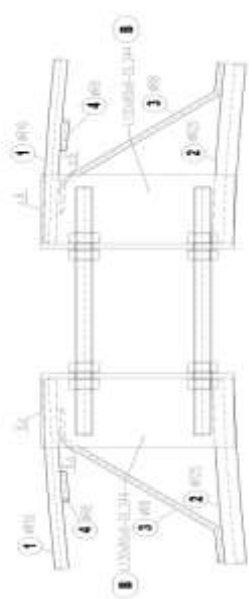
Vznikla zde také nová technická řešení přechodových detailů. Jednalo se o provázání primárních a sekundárních ostění. Schéma postupu výstavby Obr. 11.



Obr. 11. Postup výstavby v detailu napojení bočního tunelu na střední:

- 1) Hora, 2) Primární ostění levého tunelu, 3) Stříkaná izolace, 4) Zesílení stříkané izolace v místě pracovní spáry, 5) Hadičky pojistného injektážního systému, 6) Ocelová přechodová deska, 7) Primární ostění levého tunelu, 8) Krystalizační plechy ve spáře, 9) Sekundární ostění klenby, 10) Ochrana smykových trnů polystyrenem, 11) Sekundární ostění trámu, 12) Primární ostění středního tunelu, 13) Sekundární ostění klenby středního tunelu
zdroj: [20]

V primárním ostění byly navrženy dva řízeně vytvořené klouby (příloha č. 11 - 12) a rektifikace příhradových ráků (Obr. 12). Klouby byly umístěny do míst provázání primárních ostění jednotlivých tunelových trub. V těchto místech byla přerušena nosná výztuž primárního ostění a ráky zde byly nasunuty tak, aby byla možná jednoduchá demontáž části ostění pomocí lehké mechanizace. V tomto detailu se nacházely také vylamovací plechy pro napojení ostění. Rektifikace příhradových ráků sloužila pro lepší usazení ráků ve vrcholu klenby a dně. Také byly v rámci primárního ostění využity tzv. sloní nohy.



Obr. 12. Detail rektifikace spojení ráku v místě 1. úrovně výrubu, zdroj: fotoarchiv Subterra a.s.

Ražba bočních tunelů ani při obezřetném průběhu prací nedosahovala dostatečných předpokladů pro zvládnutí včasné připravenosti staničních tunelů pro přesun TBM do stanice Petřiny. Při ražbě LST docházelo, i přes projektová opatření typu stabilizačního nástřiku otevřeného výrubu a využití výstroje výrubu, k opakujícímu se narušení čelby. V průběhu byly prokázány nepříznivé sklony diskontinuit v čelbě, výrazný přítok podzemních vod, výška nadloží a míra zvětrání poloh břidelic. Právě voda ovlivňuje smykovou pevnost v otevřeném výrubu a tedy i jeho stabilitu.

Konečné řešení podoby stanice bylo ovlivněno průtahem TBM. Předcházel tomu komplikovaný proces rozhodování, kdy bylo nejdříve rozhodnuto o přizpůsobení výstavby průtahům strojů. Což mělo za následek rozhodnutí o celkové délce staničního tunelu a přesunu technologické části stanice do hloubené části. Celková délka bočních tunelů byla tedy stanovena až ve chvíli výstavby z původních 172 m na 100 m a ploše 71 m^2 (každý). Ražba obou bočních tunelů byla ukončena v prosinci 2011, kdy byly realizovány startovací komory pro TBM. [14-16]

4. 2. Příprava pro protažení technologie EPBS, ovlivnění činností v prostoru stanice

Po ukončení ražeb bočních tunelů byly realizovány zarážky pro stroje TBM. Jednalo se o silně armované prstence délky 10 m. Tyto prstence plnily funkci startovacích prostor pro TBM, které pokračovaly dále do stavební jámy E2. Pro protažení tunelovacích strojů stanicí bylo nutné vybudovat železobetonové kolébky s šikmo vloženými ocelovými kolejnicemi (obr. 13.), které byly následně po protažení technologie odbourány.

Stavební práce na stanici byly během doby obsazení stanice technologií EPBS pozastaveny. Prostor bylo nutné uvolnit nejen kvůli průtahům štítů, ale také k následnému využití prostor pro technologie odtěžování a zásobování TBM. V květnu 2012, kdy štíty dorazily do stanice Bořislavka, mohla být veškerá logistika přesunuta do stavební jámy E2 a

realizace stanice Nádraží Veleslavín mohla pokračovat. V době pozastavení stavby byly prováděny zkoušky stříkané izolace, výběr jejich zhotovitele, ale také byly započaty práce na únikovém objektu. [14-16]



Obr. 13. Pohled na zarážku pro TBM a protažení tunelovacího stroje EPBS po kolébkách se šikmo vloženými kolejnicemi, zdroj: fotoarchiv Subterra.a.s.

4. 3. Únikový objekt

Štola sloužící jako únikový objekt byla situována podél pravé tunelové trouby. Zpřístupněna byla pomocí šachty na JZ straně stanice. Dílo bylo raženo v přímém směru se stanicí, a s obloukovým koncovým úsekem a zaústěním do středového tunelu.



Obr. 14. Pohled na proces hloubení přístupové šachty, vpravo realizace mikropilotového deštníku, zdroj: fotoarchiv Subterra.a.s.

Únikový objekt byl realizován ve dvou fázích. Na počátku roku 2012 byla zahájena první etapa prací na únikovém objektu, a to hloubení přístupové šachty a ražba přímého úseku. Šachta byla v předstihu zajištěna železobetonovými pilotami. Hloubení probíhalo svisle a piloty byly postupně opatřovány kari sítí a betonovým nástřikem tzv. „na sucho“. V místě portálu propojovací štoly byl realizován ochranný mikropilotový deštník.

Štola byla vyražena v 1. etapě (tzv. přímý úsek) v délce 35,4 m a celkovém profilu $11,96 \text{ m}^2$. Druhá etapa pokračovala v době realizace středového tunelu, kdy byl doražen zbývající úsek únikové štoly, a započala ražba únikového objektu nad prostorem středového tunelu pod ochranou deštníku z tryskové injektáže. Následně po vyražení únikového objektu byl vyražen středový tunel. Byla zde použita stříkaná izolace, jako na hlavním tunelu, z důvodů napojení hydroizolačních systémů děl. Definitiva únikové štoly byla tvořena základovou deskou a klenbou. Napojení na středový tunel bylo realizováno klenbou a 4 svislými stěnami, které sloužily jako podpora a napojení na ostění středního tunelu. V posledním kroku výstavby únikového objektu se realizovalo definitivní ostění dna a obvodový plášť. Definitiva únikové štoly a napojení na středový tunel probíhala v několika krocích. První byla betonována základová deska a následně klenba štoly za pomoci betonářské formy, která byla při napojování únikové štoly na hlavní objekt doplněna bedněním bočních stěn. Klenba a čelní stěna pak musela být betonována zvlášť z konstrukce opřené o základovou desku středového tunelu. [14-16]

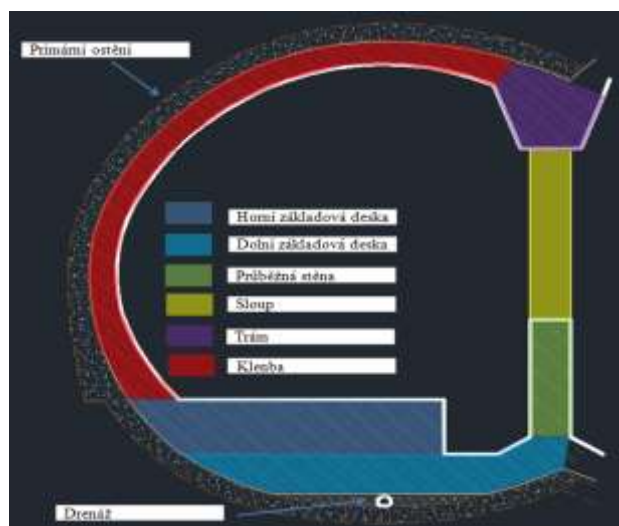


Obr. 15. Konstrukce pro betonáž klenby a stěn únikového objektu, vpravo pohled na definitivu klenby únikové štoly zdroj: fotoarchiv Subterra a.s.

4. 4. Definitivní ostění bočních tunelů

Práce na definitivním ostění započaly v květnu 2012. Podélné boční tunely a jejich vnitřní nosné konstrukce byly rozděleny celkově na 3 dilatační celky A, B, C o délce zhruba 33 m. Jednotlivé celky byly rozděleny pracovními spárami na sekce. Nosné konstrukce pak byly dále příčně rozděleny:

- základová deska členěna horizontální spárkou na horní a dolní základovou desku s dvěma výškovými úrovněmi
- průběžné stěny
- sloupy (podélně po cca 6 m) a trámy
- klenby
- v poslední dilataci byla řešená také přechodová stěny mezi profilem NRTM a TBM



Obr. 16. Příčné rozdělení nosných konstrukcí, zdroj:[16]

Sekundární ostění je železobetonové z několika typů betonových směsí:

- pro stěny, základové desky a klenby C30/37 XC1 - Dmax 16 s maximálním průsakem do 30 mm
- trámy a sloupy C45/55 XC1 - Dmax 16 samozhutnitelný s maximálním průsakem do 30 mm
- betonářská výztuž z oceli B500B a zámečnické výrobky S235.

Definitivní ostění bylo využito z pohledu hydroizolace jako pojistný systém. Docílilo se tak úpravou vodonepropustnosti betonu v ploše a ošetření pracovních spár. Byla zde limitně omezena šířka trhlin v ostění a kolmo vloženy plechy, s krystalizačním nátěrem do pracovních spár v příčném a podélném směru. [14-16] Postup výstavby definitivního ostění včetně hydroizolace byl realizováno v tomto postupu:

- podkladní betonu dna s vloženou drenáží
- hydroizolace s dostatečným přesahem pro napojení na klenbu
- armování a betonáž spodní klenby definitivního ostění ve dvou fázích (včetně detailů)
- hydroizolace trámu
- armování, betonáž stěn včetně osazení armokošu a sloupů
- armování a s ním spojená betonáž trámů s sloupy (včetně osazení vylamovací výztuže a detailů)
- hydroizolace klenby
- armování a betonáž klenby definitivy (včetně detailů)

Postup výstavby probíhal směrem od portálu do hory několika činnostmi souběžně: aplikace stříkané izolace, montáž armatury, betonáž jednotlivých konstrukčních prvků [14-16]



Obr. 17. Výstavba definitivního ostění, zdroj: fotoarchiv Subterra.a.s.

Pro armování kleneb zde byl využit speciální armovací vůz s atypickou jednostrannou ocelovou formou, která navazovala na trám s dvojitým čílkováním[14-16]. Při aplikaci hydroizolace musela být aplikovaná místa chráněna proti úkapům vody nebo jakémukoli působení aktivních průsaků.



Obr. 18. Betonářská forma a dělené čílko, zdroj: fotoarchiv Subterra.a.s.

Obtížné bylo především provádění armatury. Při provádění dna bylo nejvíce pracné provázání vertikální armatury mezi jednotlivými sekcemi dna a také bednění čel pracovních sekcí s velkým množstvím průběžných prutů a kolmo vloženými krystalizačními plechy. Jako nejnáročnější byla v rámci definitivních ostění označena [14] betonáž sloupů a nosného trámu. Bednění bylo provedeno ze standardních bednicích dílců, které byly doplněny zakázkově vyráběnými prvky. Postup[14]:

- aktivace podpůrných stojek, ztužení, kotvení a podbednění spodní strany trámu
- bednění zadní strany trámu a jeho dotěsnění k povrchu primárního ostění
- příprava a odejmutí přední strany bednění trámu (do prostoru tunelu)
- instalace armokošů mezi sloupy s připraveným přechodovým detailem se smykovými trny a krystalizačním plechem
- provedení průběžné výztuže a doarmování výztuže nad sloupy u čel dilatací, kontrola armatury
- bednění sloupů
- opětovná instalace bednění přední strany trámu
- bednění čel v dilatacích
- celková kontrola bednění
- betonáž sloupů a samotného trámu

Po provedení trámu byla aplikována stříkaná izolační membrána v klenbě a betonáž tunelové klenby v pracovních sekcích po cca 6 m.

4. 5. Ražba a primární ostění středního tunelu

Ražba středního tunelu započala v návaznosti na hydroizolace a definitivu bočních tunelů. V rámci časové úspory byly projektantem stanoveny limity pro zahájení ražby středního tunelu i bez dokončené definitivy bočních tunelů. Pevnostní limit byl dán pevností betonu a to 28 dní, který musel být v první dilataci A splněn pro opěří a dno. Průměrný záběr byl 1 m s rychlostí ražby 2 m/24 h. Zajišťování probíhalo pomocí vrstev kari sítí, příhradových oblouků a stříkaného betonu tl. 300 mm. Vyztužení bylo navázáno v přechodových detailech primárních ostění bočních tunelů. Kalota a čelba byla podpořena samozávrtnými injektovatelnými svorníky, samozávrtnými injektovatelnými kotvami [14-16].



Obr. 19. Ražba středového profilu vlevo kaloty vpravo dna, zdroj: fotoarchiv Subterra.a.s.

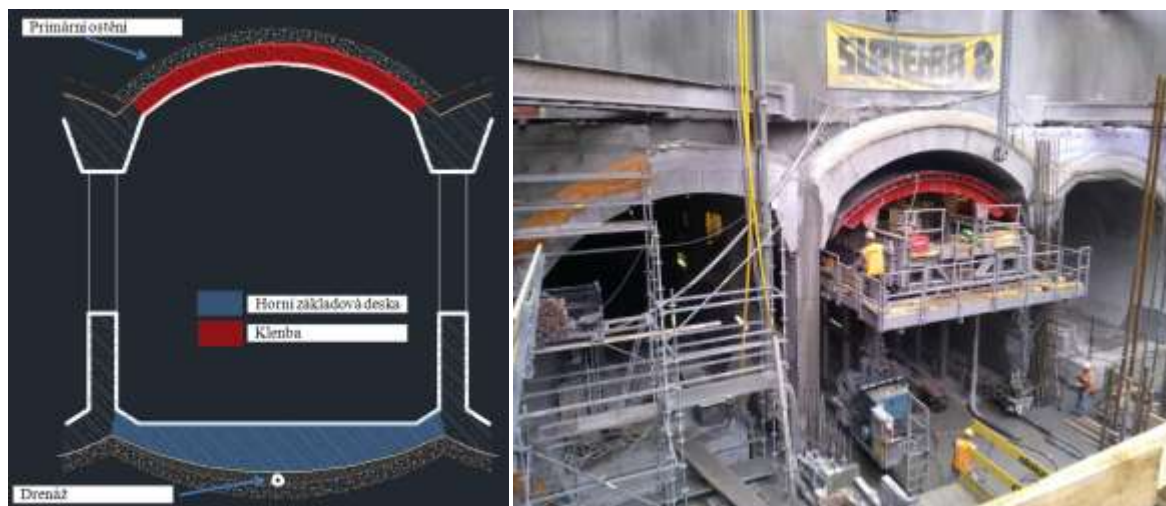
Ve středovém tunelu byla také projektována nefekální jímka o ploše $22,4 \text{ m}^2$ a hloubce 3,8 m zajištěná při ražbě 32 mikropilotami.

4. 6. Definitivní ostění středního výrubu

Práce na definitivním ostění započaly v únoru 2013. S přípravou na betonáž sekundárního ostění bylo možné začít, až byly konvergence primárního ostění ustáleny nebo klesly pod stanovenou limitní hodnotu. Podélně byl středový tunel členěn na stejné tři dilatační celky jako u bočních staničních tunelů. Definitivní obezdívka středového tunelu byla příčně dělena:

- základová deska s jednou výškovou úrovní
- klenba
- čelní stěna
- nefekální jímka v poslední dilataci

Průběh výstavby definitivního ostění probíhal ve stejném sledu jak v bočních tunelech (směrem od portálu). Souběžně probíhaly práce na izolaci, armatuře a betonáži. Definitivní ostění bylo využito z pohledu hydroizolace jako pojistný systém. Docílilo se tak stejnou úpravou vodonepropustnosti betonu v ploše a ošetření pracovních spár krystalizačními plechy. [14-16]



Obr. 20. Příčné dělení nosných konstrukcí, vpravo realizace definitivního ostění, zdroj: fotoarchiv Subterra.a.s.

5. Matematický model postupu výstavby

V rámci transparentnosti technologie, postupu výstavby a chování výrubu byl v rámci této práce zpracován matematický model pomocí softwaru Plaxis version 8.0.

5. 1. Úvod k matematickému modelování metodou MKP za využití programu Plaxis

Metoda konečných prvků neboli Finite Element Method je numerická metoda modelování kontinua a využívá se zejména pro řešení rozsáhlé třídy inženýrských problémů. V dnešní době má nezastupitelné místo v podzemním stavitelství, kde je důležitým nástrojem nejen pro simulaci průběhů deformací v okolí tunelové trouby. Základním elementem je prvek konečných rozměrů. Řešená oblast je rozdělena na konečný počet prvků tzv. diskretizace. Pro každý typ prvku je charakteristický počet a poloha jeho uzlů (nejčastěji využívaný trojúhelník). V těchto uzlech jsou pak hledané neznámé parametry. Hustota sítě zásadně ovlivňuje kvalitu výsledků. Z matematického hlediska je MKP používána pro nalezení aproximovaného řešení parciálních diferenciálních rovnic. [6]

Program Plaxis version 8.0. pracuje na základě MKP a je využíván na analýzu stabilitních geotechnických problémů. V programu je možno volit různé konstituční modely pro řešení úlohy.

Pro vytvoření úlohy se začíná v modulu *INPUT*, ve kterém jsou zadávány veškeré vstupní údaje jako: geometrie, charakteristika materiálů, okrajové podmínky. Důležitým prvkem v tomto modulu je určení hladiny podzemní vody, výpočet tlaku a počátečního napětí v hornině neboli *INITIAL CONDITIONS*, kterým se definuje počáteční stav (výchozí stav) úlohy, na který navazují další fáze výpočtu. Po zadání výchozího stavu se postoupí do modulu *CALCULATION*, kde jsou zadávány jednotlivé kroky výpočtu po částech tak, jak je budována

geotechnická konstrukce. S využitím β -metody lze nasimulovat i trojrozměrné efekty (jako je proběhnutí deformací před zajištěním výrubu). *OUTPUT* (neboli výstup) umožňuje vygenerovat kompletní výsledky řešené geotechnické úlohy nebo jen vybranou část, body v různých veličinách, grafech, sekvenčních obrázcích apod.

5. 2. Numerický model stanice metra Nádraží Veleslavín

Výpočetní model byl lokalizován v příčném řezu 13.280,000. Mocnost nadloží nad vrcholem kaloty středního výrubu se pohybuje okolo 14 m. Geologický profil je zastoupen především břidlicemi různého typu zvětrání, nad kterými se nachází deluviální sedimenty a navážky. Pevnostní a přetvárné vlastnosti horninového prostředí jsou zadány z výsledků doplňkového průzkumu, kde jsou přímo stanoveny doporučené hodnoty pro výpočet tab. 1.

Horninový masiv je modelován jako odvodněný. Počáteční geostatická napjatost je uvažována na základě objemové tíhy. Okrajové podmínky v geotechnických podmínkách nazýváme tzv. tuhými vanami. Jedná se o standardní okrajové podmínky statické rovnováhy, které jsou zadávány na hranici rozsahu. Rozsah modelu by měl odpovídat tzv. deformačním hranicím tj. místo, kde již nejsou předpokládány deformační změny a tedy není ovlivňován výpočet v zájmové oblasti. [17]

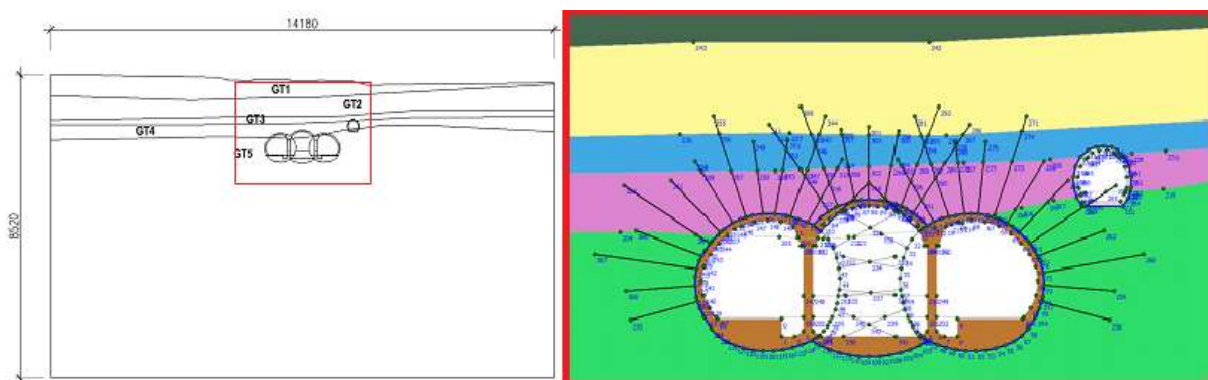
Predikce chování horninového masivu byla realizována Mohr-Coulombovým konstitučním modelem, pružně-ideálně plastickým, který využívá pro výpočet materiálové parametry - E , ν , c , ϕ , ψ . K predikci byl použit princip tzv. β -metody.

β -metoda: ukazuje aplikaci 3D reakce do rovinné úlohy zavedením fiktivního radiálního napětí, které je složeno z geostatického napětí před výrubem a parametru charakterizujícího faktor redukce napětí β . Redukce napětí tedy probíhá ve vztahu $\beta_d = (1-\beta)$ [6], kdy je redukována geostatická napjatost z okolí výrubu o tuto hodnotu a zbylé deformace proběhnou až v další etapě již s podporou primárního ostění[9]. Tedy $\sigma_r^f = \beta_d \sigma_r^0$.

Chování výztužných materiálů bylo modelováno jako lineárně elastické. Definice softwarem Plaxis probíhá pomocí tlakové tuhosti EA a ohybové tuhosti EI na běžný metr více viz tab. 2-4

Vstupní parametry – INPUT

- **Geometrie**



Obr. 21. Rozměry modelu a detail geometrie modelu

Základ pro geometrii tvořila projektová dokumentace, která byla vhodně upravena pro import do programu. Kvůli složitosti konstrukce byla geometrie pomocí formátu *.geo* naimportována pouze zčásti, pomocí základních bodů tvořících geometrii, kdy zbývající počet bodů pro vytvoření geometrie modelu byl zadáván ručně pomocí souřadnic X a Y. Body byly posléze vhodně spojeny úsečkami (pomocí funkce *LINE*), které vytvořily podobu průřezu tunelu a jeho kotvení. Dále byl vytvořen rozsah úlohy a to $12r$ horizontálně a $8r$ vertikálně. Dle příčného geologického řezu staničením byly vytvořeny jednotlivé hranice mezi různými typy geomateriálů. [17]

- **Materiálová charakteristika použitých materiálů**

Ve funkci *Material sets* (Materiálové sady) bylo nutné nadefinovat všechny využívané materiály, jejich konstituční modely. Jednotlivé sady jsou dle softwaru rozděleny:

- *Soils and Interfaces* (tab. 1-2) - zde byly zadány jednotlivé zeminy (MC konstituční model) a sekundární ostění (*Elastic*).

Geotechnický typ	γ (kN/m ³)	E_{def} (MPa)	ν	φ_{ef} (°)	c_{ef} (kPa)	Model
GT1-An	18,5	4	0,35	25	15	MC
GT2-Qd	21	12	0,35	21	20	MC
GT3-OB _e	22,5	20	0,35	23	25	MC
GT4-OB _z	24	50	0,3	26	35	MC
GT5-OB	25,2	150	0,25	38	70	MC

Tab. 1. Zeminy a rozhraní

Ostění	γ (kN/m ³)	E_{def} (MPa)	ν
sekundární ostění shodné i pro sekundární ostění OU	25	320	0,2

Tab. 2. Sekundární ostění

- *Plates* - primární ostění dle PD (*Elastic*) tab. 3.

Ostění	EA (kN/m)	EI (kNm ² /m)	ν	d (m)	w (kN/m/m)	Model
primární ostění	8,70E+06	6,53E+04	0,2	0,3	7,5	elastic
primární ostění OU	7,25E+06	3,78E+04	0,2	0,25	6,25	elastic

Tab. 3. Primární ostění

- *Anchors* - svorníky (určeny pomocí tlakové tuhosti EA a rozpětí tzv. L_{spacing}) tab.4.

svorníky	EA (kN/m)	L_{spacing} (m)	Model
sklolaminátové	2,81E+04	8,90E-01	elastic
ocelové	1,31E+05	8,90E-01	elastic

Tab. 4. Svorníky

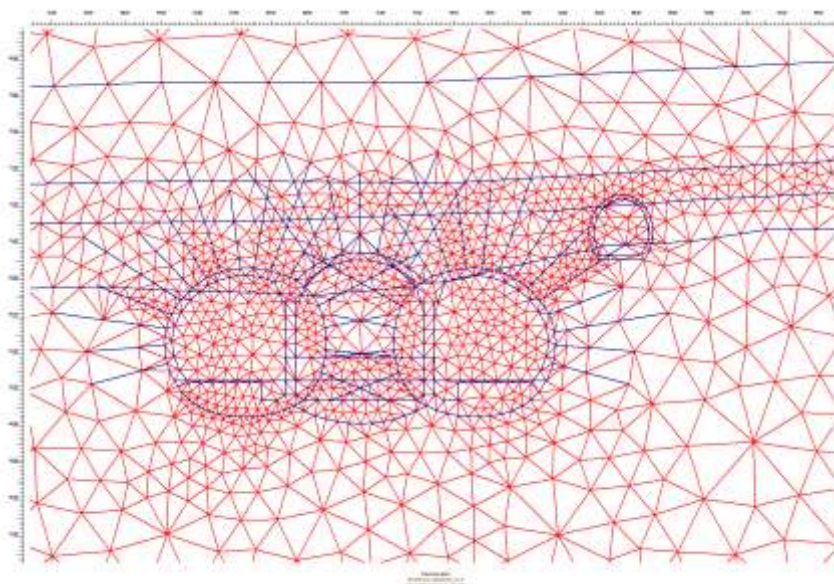
- **Konstrukce**

Konstrukce byly nadefinovány takto:

- Primární ostění pomocí f-ce *Plate* - charakterizace vnější linky ostění a přiřazení materiálové sady
- Sekundární ostění - je definováno plošně v celé tloušťce a charakterizováno materiálovou sadou
- Svorníky – jejich délka a směr definována pomocí funkce *Node-to-Node Anchor*, charakterizována materiálovou sadou

- **Sít'**

Kontinuum bylo triangulováno pomocí 15 uzlových trojúhelníkových prvků. Sít' byla dle zásad triangulace upravována pomocí opakované generace nástrojem *Generate Mesh* a *global coarsenes*, díky kterému lze sít' zahušťovat na určených místech. Cílem bylo dosáhnout ideálního tvaru trojúhelníků a především zjemnění sítě v místech očekávaných velkých změn. Prioritně v okolí a uvnitř tunelového tělesa. Sít' je tvořena 3986 prvky a 32089 uzly.



Obr. 22. Detail sítě modelu

- **Výchozí stav**

Jak již bylo uvedeno ve funkci Initial conditions se vyjadřuje počáteční geostatická napjatost. Vzhledem k odvodněnému prostředí není potřeba určovat hladinu podzemní vody (ta je umístěna na spodním okraji modelu). Vytváří se tak počáteční výchozí stav pro výpočetní modul.

Výpočet - CALCULATION

Ve výpočetním modulu byla celá výstavba rozfázována na celkem dvacet fází dle PD postupu ražby stanice – viz obr. 9. Z důvodů transparentnosti modelu byl modelován pouze proces výstavby. Nejsou zde již dále přidány fáze, kdy je tunelové těleso zatíženo vodou, a primární ostění se svorníky jsou deaktivovány, tyto fáze slouží pro konečnou vyhovující dimenzaci sekundárního ostění.

Celý výpočet vychází z iniciační fáze, která je dána horninovým prostředím. Následující fáze vždy navazuje na předchozí. Výpočet je prováděn v kalkulačním modelu *Plastic*

1. fáze: Výrub kaloty LT

- před zajištěním výrubu proběhlo 20 % deformací tzn. v kalkulačním modulu v záložce *Parameters* bylo nastaveno $Mstage=0,2$
- definováno: výrubem kaloty

2. fáze: Primární ostění, svorníky LT

- definováno: výrubem kaloty; aktivací primárního ostění a svorníků

3. fáze: Výrub dna LT

- $Mstage=0,2$
- definováno: výrubem kaloty; aktivací primárního ostění a svorníků; výrub dna

4. fáze: Primární ostění dna LT

- definováno: výrubem; aktivací primárního ostění a svorníků LT

5. fáze: Výrub kaloty PT

- $Mstage=0,2$
- definováno: výrubem v celém profilu; aktivací primárního ostění a svorníků LT a výrubem kaloty PT

6. fáze: Primární ostění, svorníky PT

- definováno: výrubem; aktivací primárního ostění a svorníků LT a výrubem kaloty PT ; aktivací primárního ostění a svorníků PT

7. fáze: Výrub dna PT

- $Mstage=0,2$
- definováno: výrubem; aktivací primárního ostění a svorníků LT; výrubem PT a aktivací primárního ostění a svorníků

8. fáze: Primární ostění dna PT

- definováno: výrubem; aktivací primárního ostění a svorníků LT a PT

9. fáze: Ražba štoly únikového objektu

- $Mstage=0,2$
- definováno: výrubem; aktivací obou bočních tunelů; výrubem únikové štoly v plném profilu

10. fáze: Primární ostění únikové štoly

- definováno: výrubem; aktivací výztuže obou bočních tunelů; výrubem a aktivací primárního ostění únikové štoly v plném profilu

11. fáze: Sekundární ostění únikové štoly

- definováno: výrubem; aktivací výztuže obou bočních tunelů; výrubem únikové štoly v plném profilu, aktivací primárního ostění a sekundárního ostění únikové štoly v plném profilu

12. fáze: Sekundární ostění LT

- definováno: výrubem; aktivací výztuže obou bočních tunelů; výrubem, aktivací primárního ostění a sekundárního ostění únikové štoly v plném profilu; aktivací sekundárního ostění LT

13. fáze: Sekundární ostění PT

- definováno: výrubem a aktivací výztuže obou bočních tunelů; výrubem, aktivací primárního ostění a sekundárního ostění únikové štoly v plném profilu; aktivací sekundárního ostění LT a PT

14. fáze: Výrub kaloty ST

- $M_{stage}=0,4$
- definováno: výrubem a aktivací výztuže obou bočních tunelů; výrubem, aktivací primárního ostění a sekundárního ostění únikové štoly v plném profilu; aktivací sekundárního ostění LT a PT; výrub kaloty ST a deaktivace sklolaminátových svorníků zasahujících do výrubu ST.

15. fáze: Primární ostění ST

- definováno: výrubem a aktivací výztuže obou bočních tunelů; výrubem; aktivací primárního ostění a sekundárního ostění únikové štoly v plném profilu; aktivací sekundárního ostění LT a PT; výrub kaloty ST a deaktivace sklolaminátových svorníků zasahujících do vyrubaného profilu ST; aktivace primárního ostění a svorníků kaloty ST

16. fáze: Bourání 1. části primárního ostění bočních tunelů

- definováno: výrubem a aktivací výztuže obou bočních tunelů; výrubem, aktivací primárního ostění a sekundárního ostění únikové štoly v plném profilu; aktivací sekundárního ostění LT a PT. Výrubem kaloty ST a deaktivace sklolaminátových svorníků zasahujících do vyrubaného profilu; aktivací primárního ostění a svorníků kaloty ST; deaktivace primárního ostění bočních tunelů a zeminy v kalotové části - zarovnání pro účely sjezdové rampy

17. fáze: Výrub dna ST

- $Mstage=0,4$
- definováno výrubem: aktivací primárního a sekundárního ostění bočních tunelů a únikové štoly; aktivací primárního ostění a svorníků kaloty ST; deaktivace primárního ostění bočních tunelů a zeminy v kalotové části - zarovnání pro účely sjízdné rampy; dobírka dna a deaktivace zbývajících sklolaminátových svorníků

18. fáze: Primární ostění dna ST

- definováno výrubem: aktivací primárního a sekundárního ostění bočních tunelů a únikové štoly; aktivací primárního ostění a svorníků kaloty ST; deaktivace primárního ostění bočních tunelů a zeminy v kalotové části - zarovnání pro účely sjízdné rampy; dobírka dna ST a deaktivace zbývajících sklolaminátových svorníků; aktivace primárního ostění dna výrubu ST

19. fáze: Deaktivace 2. části primárního ostění bočních tunelů

- definováno: výrubem a aktivací primární a sekundární výztuže obou bočních tunelů a únikové štoly v plném profilu; výrubem a aktivací primárního ostění ST, deaktivace primárního ostění bočních tunelů zasahujících do středového výrubu

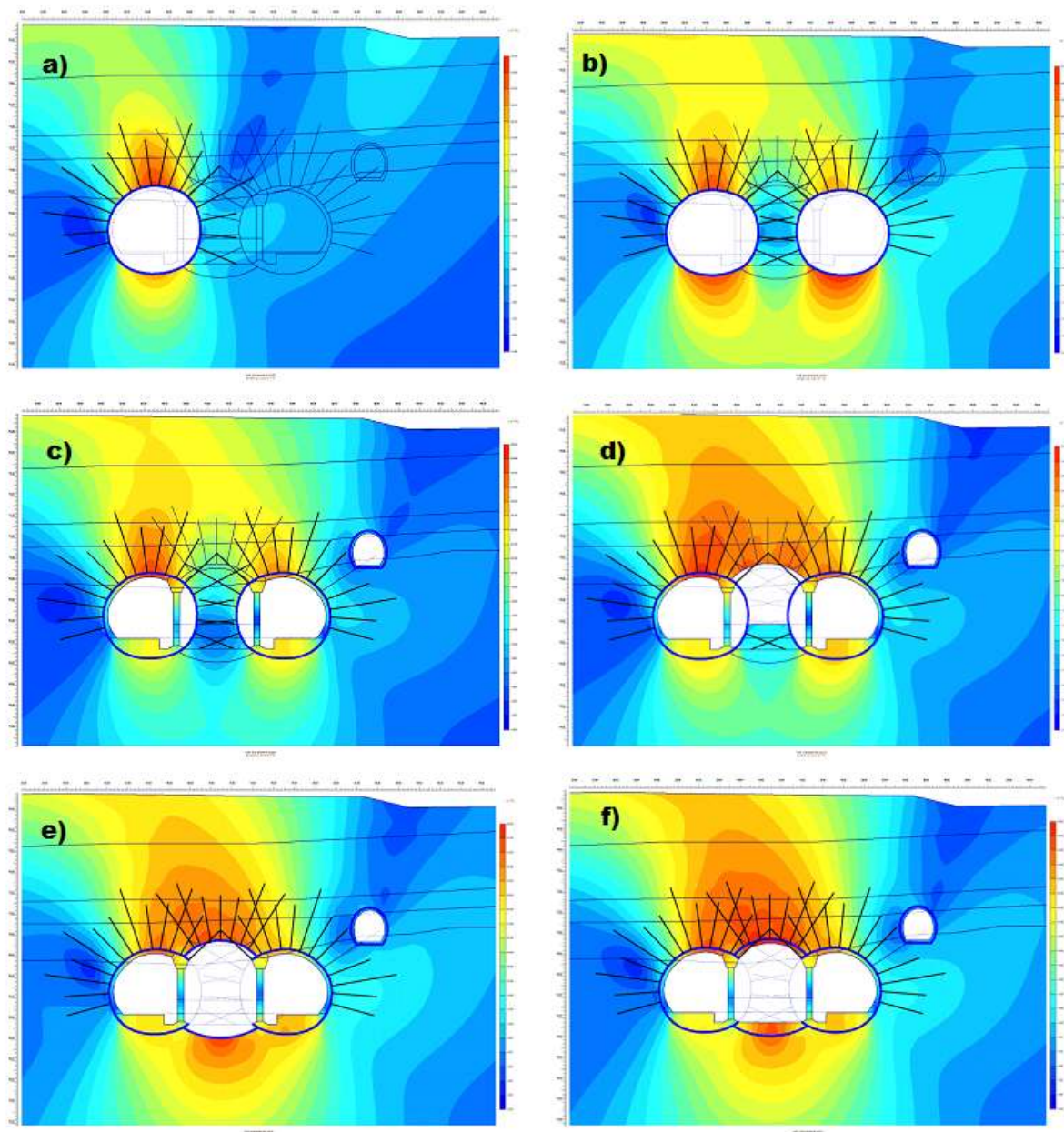
20. fáze: Sekundární ostění ST

- definováno: výrubem a aktivací primární a sekundární výztuže obou bočních tunelů a únikové štoly v plném profilu; výrubem a aktivací primárního a sekundárního ostění v plném profilu ST a deaktivace složek zasahujících do prostoru výrubu ST (sklolaminátové svorníky, část primáru bočních tunelů)

Výstup OUTPUT

Pro prezentaci výsledků celkových deformací a čerpání pevnosti při postupu výstavby byly vybrány fáze 4, 8, 13, 14, 19, 20 (popis fází viz výše). Vystihují postup výstavby v šesti krocích. Zbývající výstupy jednotlivých fází jsou uvedeny v příloze 1-9. Definování jednotlivých fází je podrobněji rozepsáno v předcházejícím textu: *Výpočet-Calculatation* str. 40

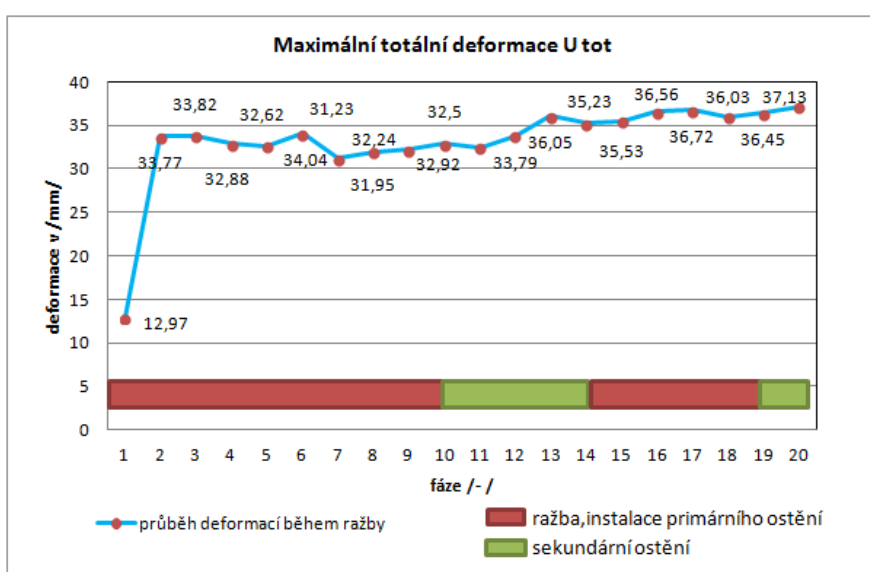
Totální deformace



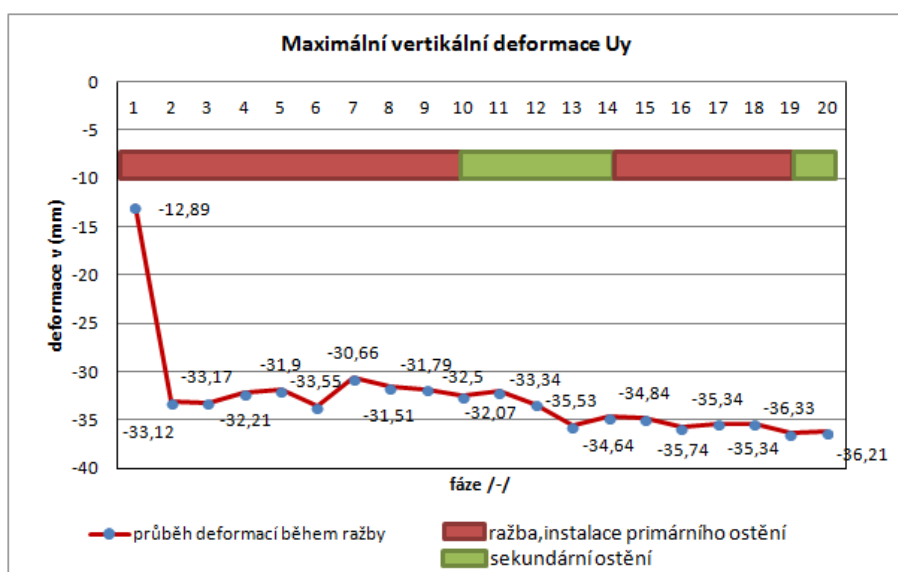
Obr. 23 Průběh totálních deformací a) fáze 4, b) fáze 8, c) fáze 13, d) fáze 14, e) fáze 19,

f) fáze 20

Při odtěžení zeminy dochází k odlehčení masivu a deformaci horniny směrem do výrubu. Největší totální deformace lze pozorovat (červeně) při ražbě levého staničního tunelu, které v 4. fázi dosahují hodnoty $U_{tot} = 33,88$ mm. Na grafu č. 3 lze pozorovat, v průběhu výrubu pravého tunelu (fáze 8; červeně), relativní ustálení deformací v rozmezí ± 2 mm. Větší výkyv deformací nastává ve fázi instalace sekundárního ostění bočních tunelů. Ražba a zajištění středového tunelu primárním a sekundárním ostěním probíhá opět ustáleně v rozmezí ± 2 mm. Průběh největších deformací (obr. 23) lze lokalizovat nad kalotou tunelového díla (červeně); k čemuž dochází díky tíze nadloží, další výrazná plocha byla lokalizována u dna.

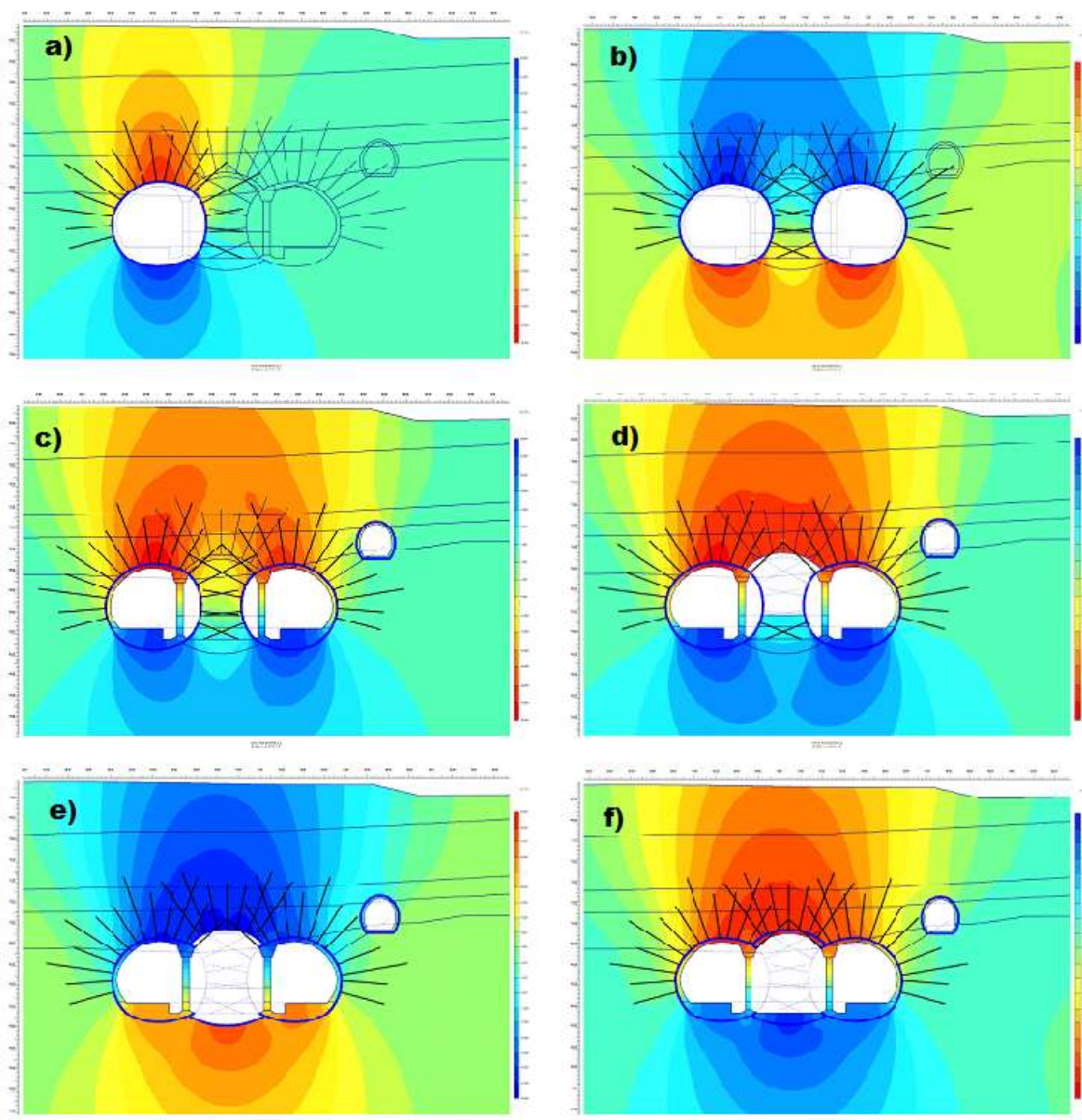


Graf č. 1. Maximální totální deformace



Graf č. 2 Maximální vertikální deformace

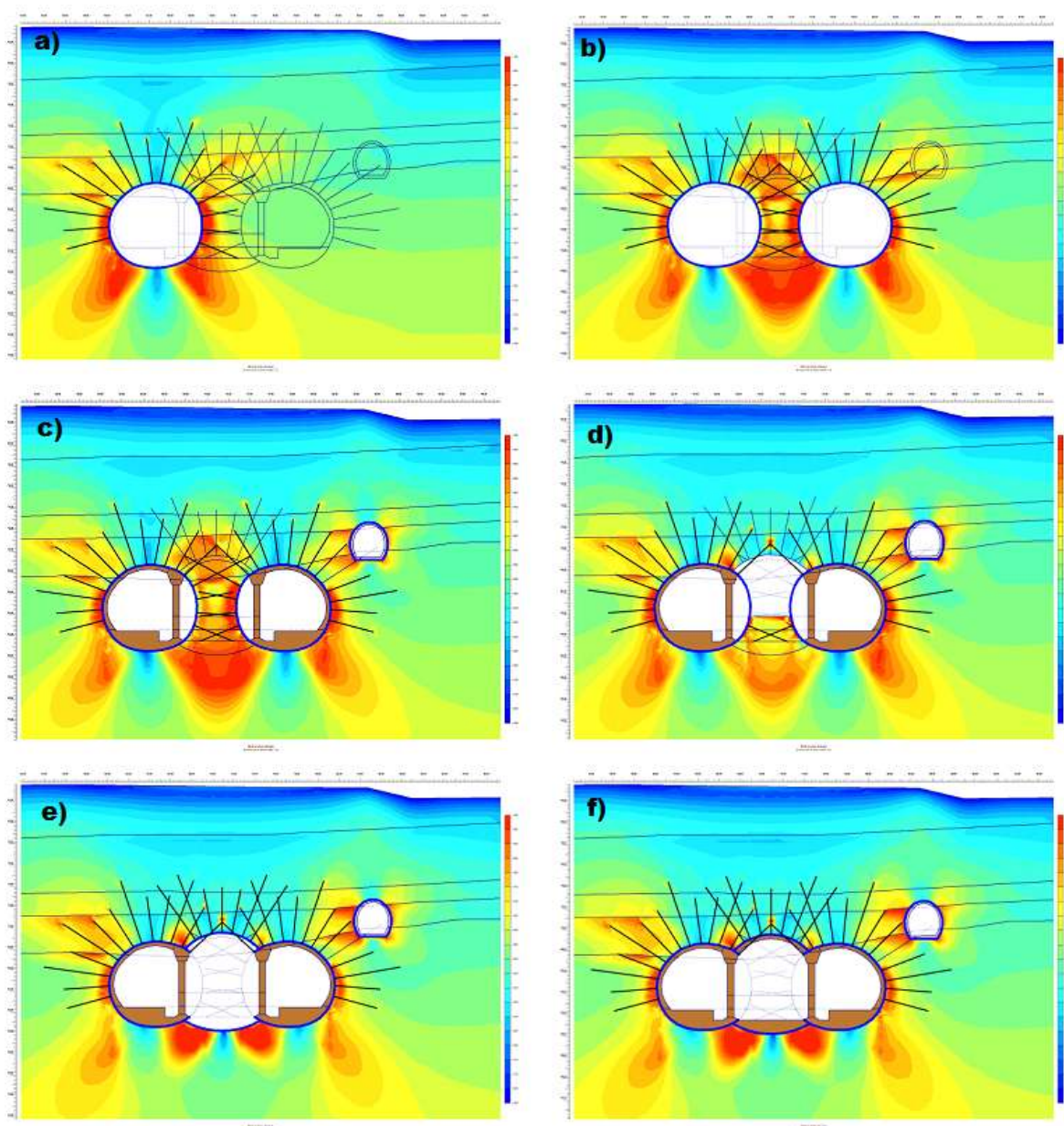
Vertikální deformace



Obr. 24 Průběh totálních deformací a) fáze 4, b) fáze 8, c) fáze 13, d) fáze 14, e) fáze 19, f) fáze 20

Na průbězích vertikálních deformací lze pozorovat, že na záporné (červeně) vertikální deformace je namáháno především přístropí výrubu, které se při stabilizaci výrubu svorníky a primárním ostěním, obr. 24 b), e), nejvíce projevují na dně výrubu. To je dáno zatížením hmotností nadloží. Při výrubu středového tunelu je namáháno opět přístropí a po zajištění je přístropí stabilizováno a na vertikální deformace trpí dno. Po instalaci sekundárního ostění ST f), které zpevní profil tunelu je možno pozorovat největší průběh deformací na přístropí.

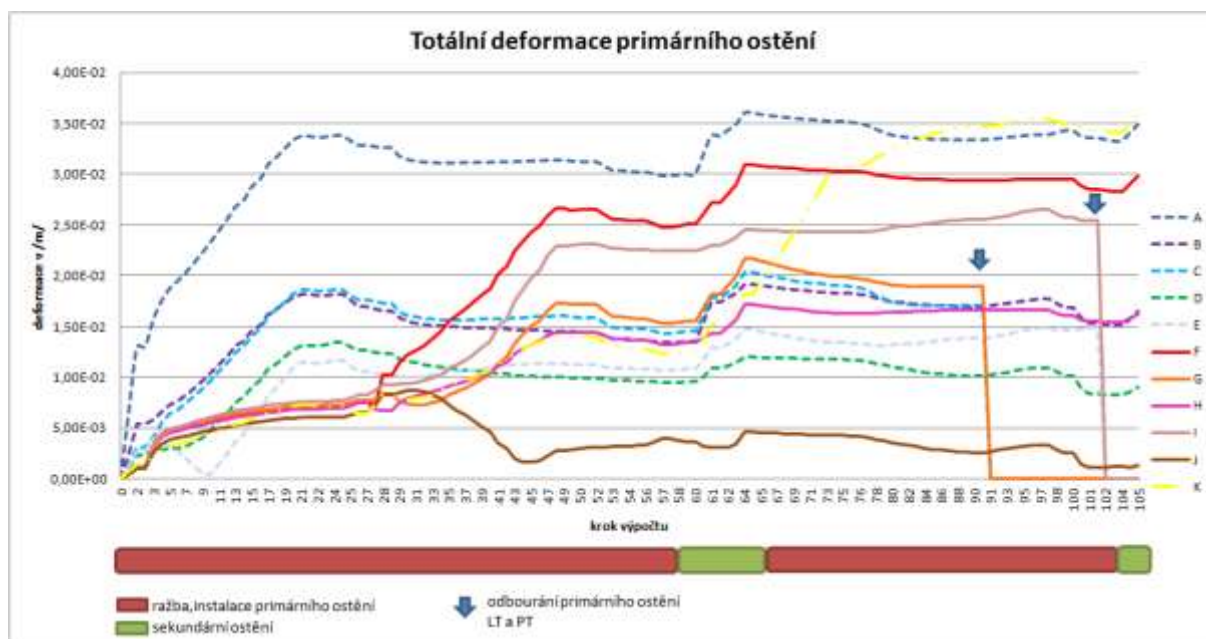
Čerpání pevnosti



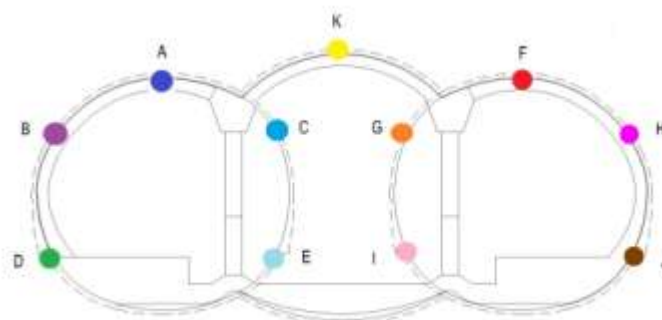
Obr. 25 Průběh totálních deformací a) fáze 4, b) fáze 8, c) fáze 13, d) fáze 14, e) fáze 19, f) fáze 20

Čerpání pevnosti probíhá především na bocích jednotlivých tunelů. Po instalaci primárního ostění středového tunelu je pozorovatelné největší čerpání pevnosti (hodnota blíží se 1 – červeně) v patách sloupů a trámů tvořící přechod ostění. Nadloží je stabilizováno výztužnými prvky (oblast s nízkým RSS - modře), které svojí tíhou zatěžuje strop a dále působí přes sloupky do dna, kde se nachází výrazná oblast RSS s limitní hodnotou 1 (červeně).

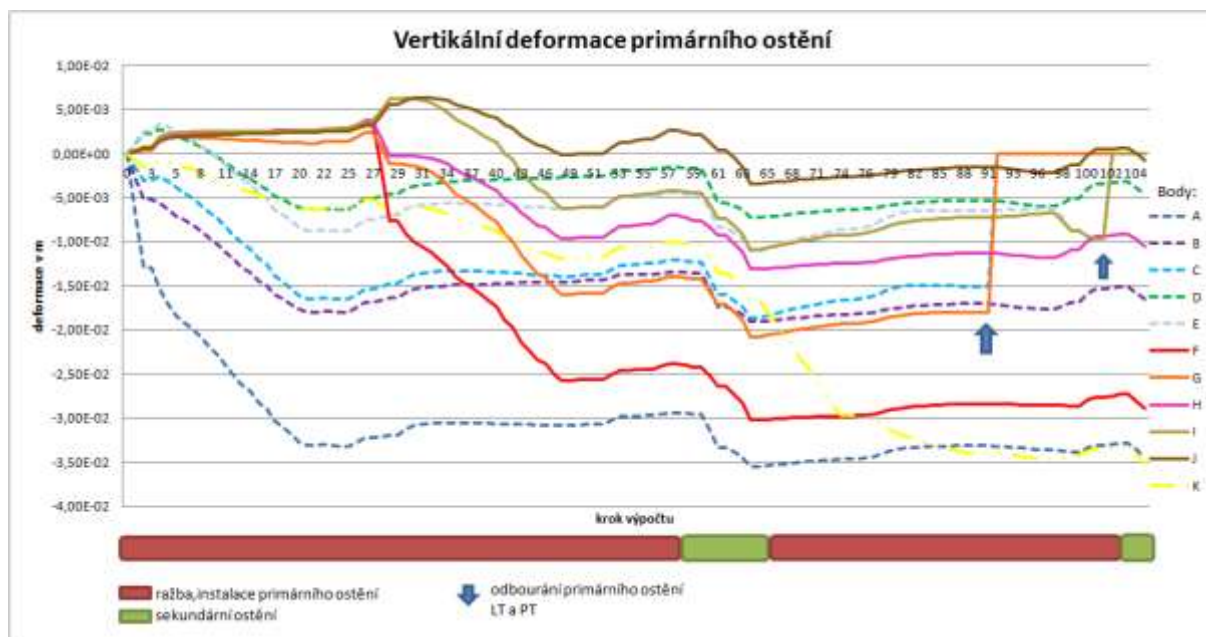
Pro představu probíhající totálních deformací na výrubu je sestaven graf, kde lze pozorovat výrazný nárůst deformací na primárním ostění nejdříve LT (čárkovaný styl čáry) a poté PT (plný styl čáry). Největší deformace probíhají v nejvyšším bodě kaloty při její ražbě a zajišťování bod A – LT = 33,8 mm, bod F-PT = 26,6 mm. Při ražbě kaloty ST (styl čáry čárkovaně s dvěma tečkami) je opět výrazný nárůst deformací primáru v bodě stropu středového tunelu na bodu K-ST = 35,1 mm (umístění KVG bodů je znázorněno na Obr. 26) Další výkyv nastává v době instalace sekundárního ostění. Na konci grafu lze pozorovat „podepření“ sekundárním mírným nadzvednutím křivky v. kroku výpočtu 100.



Graf č. 3 Totální deformace primárního ostění



Obr. 26. Schéma pozorovaných bodů



Graf č. 4 Vertikální deformace primárního ostění

Na grafu vertikálních deformací lze pozorovat ražbu jednotlivých výrubů (LT – čárkovaně, ST čárkovaně s dvěma tečkami), které se projevují nárůstem záporných deformací na primárním ostění. Body nacházející si ve dně vždy zaznamenají mírný nárůst kladných vertikálních deformací, než dojde k výrubu v jejich úrovni. Je to důsledek uvolnění horninového prostředí. Všechny body jsou téměř shodné (v záporných souřadnicích) s odchylkou desítek milimetrů s absolutní hodnotou totálních deformací, což znamená převládající vertikální deformace.

6. Organizace zásobování a dopravy pro výstavbu ražené stanice v jednotlivých fázích výstavby

Volba optimální organizace prací je u moderního ražení velmi důležitá. Otázka priorit je zde zásadní, je důležité si uvědomit, zda je preference v rychlosti postupu ražby nebo v minimalizaci nákladů. V případě stanice metra Nádraží Veveslavín převyšovala priorita postupu s ohledem na ekonomickou stránku celé prodlužované trasy. Optimální organizace postupu při cyklickém ražení musí vycházet z kvalitního plánování a včasné reakce na nastalé překážky.

6. 1. Fáze před započatím ražby

Postup prací při odtěžování stavební jámy byl operativně upravován pro ideální optimalizaci organizace odtěžení a redukce časových ztrát. Těžba probíhala ze sjízdné rampy, později vertikálně z hlavní stavební jámy. Rampa byla odtěžována po sekcích z úrovně pod ochranou pomocných rozpěr, které přetěžovaly prostor v místě definitivní rozpěry. Nejdříve tedy byla odtěžena zemina z rampy a zajištěny boční stěny rampy stříkaným betonem, převážkami a kotvami. [14-16] [10]



Obr. 27. Postup odtěžování rampy, zdroj: [16]

V rámci optimalizace probíhalo odtěžování od třetí úrovně svisle autojeřábem AD 70, který dosahoval průměrného denního výkonu $250 - 300 \text{ m}^3$. Ve čtvrté úrovni byl nasazen pásový jeřáb Lieber 854 s průměrným výkonem $400 - 500 \text{ m}^3$ a došlo k oddělení pracovišť hlavní stavební jámy a sjízdné rampy, kdy tento postup umožnil lepší časový průběh uceleného cyklu těžby v dané úrovni, s postupným zajištěním stěn a přetěžením středního pomocného sektoru v předstihu před aktivací kotev. V páté úrovni byly opět propojeny pracoviště rampy a hlavní stavební jámy a instalovány mikropilotové deštníky výrubů. [14-16] [10]

6. 2. Fáze během výstavby bočních tunelů

Zmáhání výrubu probíhalo mechanizovaně horizontálně dělenou čelbou. Minimální odstup čeleb byl stanoven na 30 m. Díky nepříznivé geologii byly zvoleny krátké záběry. Rychlost postupu obou bočních tunelů se pohybovala v horizontu 1-2m/24h pro každý profil. Organizace zásobování a dopravy probíhala standardně v cyklickém sledu po sjízdné rampě. Jednalo se o rozpojení, odtěžení, vyztužení, zajištění, kdy bylo využito beztrhavinového mechanického rozpojování tunelbagrem, impaktorem. [7] [15] [14]



Obr. 28. Postup odtěžování bočních tunelů po sjízdné rampě, zdroj: fotoarchiv Subterra.a.s.

6. 3. Fáze protažení technologie EPBS a její zásobování

Díky technologii EPBS bylo vynuceno několik zásadních změn při výstavbě a také byly veškeré práce během protažení a materiálového zásobování TBM na úseku zastaveny. Při ražbě štítů vzniká několik desítek m^3 rubaniny, kterou je potřeba zajistit na odvoz na mezideponií, dále je potřeba zajistit dopravu výplňové malty pro zainjektování prstenců a samozřejmě samotné prstence.



Obr. 29. Technologická vedení pro fungování razících štítů, zdroj: fotoarchiv Subterra.a.s.

Do logistiky se proto zahrnuje: [7] [15] [14]

- Systém pásových dopravníků - odtěžení rubaniny
- Doprava segmentů na kolové platformě MSV
- Doprava dvoukomponentní malty
- Doprava chladicí kapaliny, chladicí jednotky na chlazení motorů
- Vystrojení povrchu i podzemí

Jak již bylo uvedeno, stroje byly protaženy staničními tunely pomocí instalovaných železobetonových kolébek s šikmo vloženými kolejemi. Lze pozorovat na Obr. 29. vpravo.

6. 4. Fáze realizace středního výrubu a dokončení výstavby

V závěrečných fázích výstavby byla odbourána sjízdná rampa a následkem toho byla zavedena vertikální doprava materiálu i osob (v době dokončení prací na kalotě středního výrubu). Pracovníci využívali lezného oddělení na okraji hlavní stavební jámy. Materiál byl dopravován mobilním jeřábem. Beton byl dopravován pomocí betonářského potrubí přes beton pumpy. Betonáž středního profilu byla prováděna během výstavby hloubeného objektu. Bednění bylo tedy vertikálně spuštěno do zbývající proluky připravené v rámci výstavby hloubeného objektu a po skončené betonáži bylo kompletně demontováno v podzemí.



Obr. 26. Vertikální doprava a doprava betonu pomocí betonářské hadice, zdroj: fotoarchiv Subterra.a.s.

Seznam vozidel na stavbě: [18]

- Povrchová část :
 - Terex 210 (SW48), Trakt. bagr JCB 4CX, Boomer L2C (ABC) Regular, Volvo 120F, Meyco Potenza, VW transportér-osobní, VW transportér-valník, Nissan NP 300, autodomíchávač T 815 8x8, LIAZ /Renault, Auto - valník Tatra (Avie), autojeřáb AD 20 1ks
 - ostatní DMP od ÚDOP PND Subterra.a.s.
- Podzemní část:
 - Terex 210 (SW48) Trakt. Bagr JCB 4CX, Boomer L2C (ABC) Regular, Volvo L 120 F, Meyco Potenza, Nissan NP 300
 - ostatní DMP od ÚDOP PND Subterra.a.s.

Mapa dopravního řádu povrchu a podzemí je uvedena v příloze č. 15 a č. 16

7. Použití uzavřené stříkané hydroizolace při výstavbě

7. 1. Stříkaná hydroizolační membrána v podzemním stavitelství

Jeden ze základních faktorů ovlivňující projektovou přípravu, realizaci a využívání podzemní stavby je bezpochyby podzemní voda. Hydroizolace tak tvoří jeden ze základních prvků chránící konstrukci před jejími negativními účinky. Nejčastěji používaný hydroizolační systém v současnosti je mezilehlá foliová hydroizolace instalována mezi primární a sekundární ostění. I přes osvědčenou funkčnost této konvenční metody izolování tunelů jsou zde jistá rizika. Především se jedná o možnost poškození izolace při manipulaci, vedoucí k nefunkčnosti. Problémy mohou také nastat při řešení složitých detailů nebo přídržnosti stykový ploch, což může vést k migraci vody v ostění. Z toho plyne následná obtížná lokalizace defektu hydroizolace. V řadě situací nepomohou ani jiné tradiční metody hydroizolace, které mají také svá specifická negativa nebo omezení.

Progresivní metoda stříkané hydroizolační membrány zakládá na kontaktním spojení mezi hydroizolační membránou a vrstvami betonu. [20] Aplikace může probíhat mezi vrstvami stříkaného nebo litého betonu. Tento kompozitní systém je založen na funkčním využití stříkaného betonu a membrány (beton - membrána - beton), která musí odolat na tahovou pevnost spojení. Poprvé byla stříkaná hydroizolace použita na trase IVC2. Dále byl tento systém izolace aplikován na výtahu na Národní třídě [19] – který se vyznačoval komplikovanou geometrií a také na trojlodní stanici metra Nádraží Veleslavín - konkrétně produkt společnosti Basf.a.s. - MASTERSEAL® 345

7. 2. Stříkaná hydroizolační membrána MASTERSEAL® 345

Masterseal® 345 je založen na EVA polymeru neboli kopolymeru z ethylenu a vinylacetátu [20]

Výrobce uvádí, že se výrobek vyznačuje těmito technickými vlastnostmi: [21]

- jednoduchá příprava směsi a aplikace, rychlé vytvrzení, bez toxických složek
- odolnost proti tlakové vodě (max.) - 15 bar
- přidrženost k betonu (po 28dnech) - 1,2 MPa +/- 0,2 MPa
- váže se na ocel a většinu plechových membrán a umožňuje řešení propojením s ostatními metodami utěsnění proti vodě
- objemová hmotnost (+20°C) – 590 kg/m³ +/- 100 kg/m³
- aplikační tloušťka - 3 - 6 mm
- rychlé zrání - během 4 - 6 hodin v závislosti na podmínkách

Aplikace probíhá metodou suchého stříkání strojem MEYCO. Na trysce se do práškové směsi přidávají určené dávky vody. Zásady aplikace:

- od povrchu - 1,5 - 2,5 m
- periodické teplotní dávky vody mezi 30 - 50% hmotnosti materiálu.
- vzdálenost stříkání
- teplotní výkyvy do 10°C
- aplikace na čistý povrch
- lze nanášet na vlhké podklady (bez aktivního pronikání vody)

7. 3. Řešení aplikace technologie na stanici metra Nádraží Veleslavín

Jako jedny z prezentovaných výhod jsou jednoduchá příprava a aplikace systému stříkané hydroizolace. Stanice metra Nádraží Veleslavín, disponovala náročnými detaily pro napojení fóliové hydroizolace. Vzhledem k časovým odstupům realizace primárních a sekundárních obezdívek bylo možno provést posouzení vhodných podmínek pro využití alternativního řešení stříkané izolace. Posuzovalo se především: [21-23]

- rozsah a vydatnost průsaků podzemních vod v rámci izolovaných ploch, ustálení vodního režimu
- geometrie díla
- struktura podkladu
- navazující činnosti a souběh prací ovlivňujících aplikaci

Jako rozhodující faktor při aplikaci byla zhotovitelem označena příprava povrchu pro aplikaci. Dále se jednalo o tyto faktory:

- eliminace výronů vody na plochy podkladu a nevytrvdlou membránu
- lokální úprava povrchu
- drenáž a svod vody do centrální tunelové drenáže
- úprava dna litým podkladním betonem

Postup aplikace ve stanici Nádraží Veleslavín

Izolační membrána byla provedena ve dvou nosných vrstvách tloušťky 1 – 2 mm, barevně odlišených, v dostatečném odstupu pro zrání a vytvrdnutí. Včetně nástřiku 1 mm tlusté signální vrstvy izolace. Celková minimální tloušťka membrány byla stanovena na 3 mm. Izolace byla nanášena na očištěný povrch, a aby nedocházelo k aktivnímu působení vody, bylo zamezeno průsakům z podkladů dostupnými technologickými zásahy. Jednalo se o injektáže, přetěsnění rychlovaznou maltou, organizovaným svodem nebo ochranou tunelového dna plachtou. Po nástřiku penetrační signální vrstvy mohly být opraveny místa aktivních průsaků, které byly lokalizovány penetrační vrstvou. Následoval nástřik nosných

vrstev a provedení detailů, případné opravy poškozených míst (očištění a nanesení hydroizolace s přesahy do neporušené části. [22-23]



Obr. 27. Aplikace finální vrstvy a vpravo finální verze izolace (barevné odlišení), zdroj: fotoarchiv Subterra.a.s.

7. 4. Řešení detailůpřechodových detailů

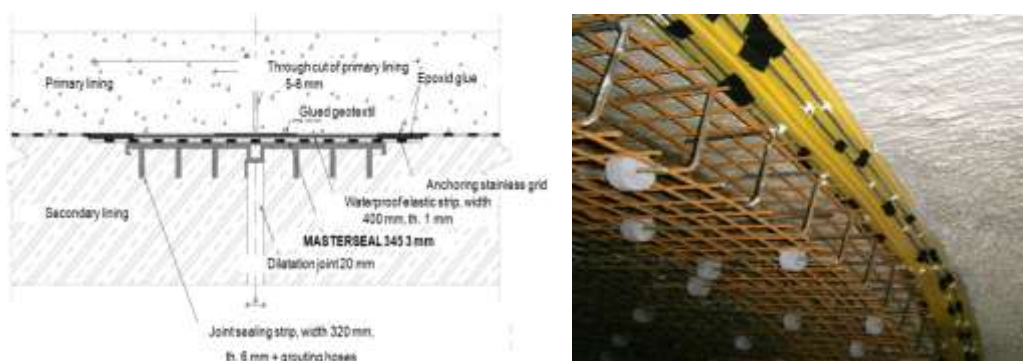
Základním rizikovým faktorem byl fakt, že hydroizolace bočních tunelů byla prováděna v čase, kdy nebyl vyražen středový tunel. To znamenalo ohrožení především detailu napojení středního tunelu následnou demontáží primárního ostění, kdy může dojít k poškození místa detailu při mechanickém odtěžování. Stříkané hydroizolační souvrství bylo použito v celém rozsahu ražené části včetně únikového objektu

Problematické detaily návrhu stříkané hydroizolace byly řešeny izolační ocelovou deskou tl. 10-15mm ukotvenou do primárního ostění s kotevními trny (jako smykovou výztuží) zabetonovanými do definitivního ostění. Tato místa byla dále nastříkaná hydroizolací s přesahem do míst napojení izolace klenby (detail v příloze č. 13).



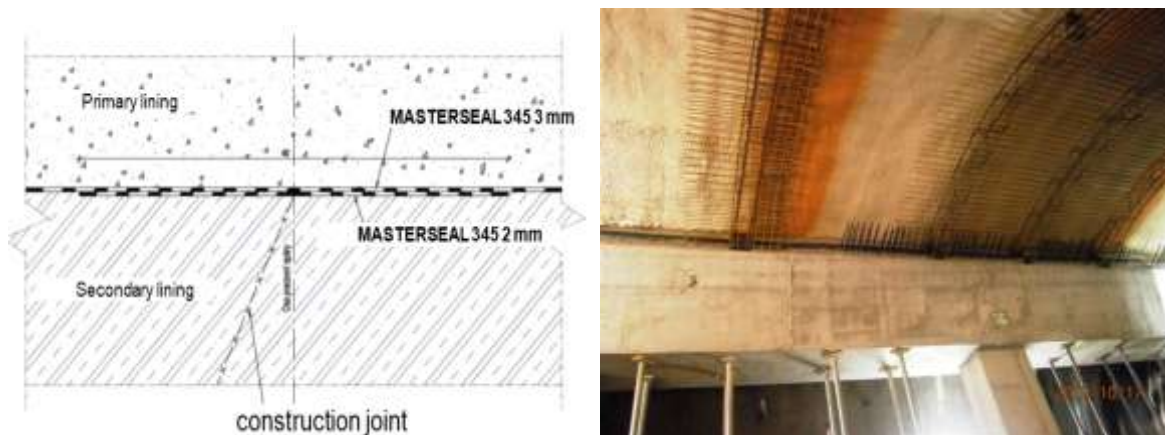
Obr. 28. Vlevo pohled na detail ocelové desky, vlevo detail ocelové desky s kotevními trny zdroj: fotoarchiv Subterra.a.s.

Dilatační spáry byly řešeny uložením spárového pásu s injekčním systémem.



Obr. 29. Vlevo detail injekčního pojistného systému, vpravo detail aplikace zdroj: fotoarchiv Subterra.a.s.

Pracovní spáry byly zesíleny další vrstvou nástřiku o 2 mm a tyto detaily byly rozlišeny odlišným barevným nástřikem-pro lepší kontrolu



Obr. 30. Vlevo detail řešení pracovní spáry, vpravo barevné rozlišení zaizolování pracovní spáry zdroj: fotoarchiv Subterra.a.s.

Přechodový detail napojení izolace na ST bylo nutné provádět s ohledem na negativní mechanické poškození při odstraňování primárního ostění bočních tunelů. Jednalo se především o detail napojení izolace a krystalizačních plechů, ale také dynamické účinky mechanizace na již provedené sekundární ostění. Tyto činnosti byly z 75% objemu prováděny hydraulickými nůžkami, následně dalších 15% sbíjením kladivem osazeným na rypadlo nakladač. A zbývajících 10% ručně. I přes pracné ruční dočišťování detailů byl zhotovitel s provedením spokojen. [14]



Obr. 31. Vlevo demontáž primárních ostění vpravo přechodový detail klenba 1)přechodový ocelový plech, 2)krystalizační plech, 3)smykové trny výztuže definitivního ostění, zdroj: fotoarchiv

Subterra.a.s.

8. Závěr a zhodnocení

První úvahy o pražském metru se objevily již koncem 19. století. Vláda ČSR v roce 1967 rozhodla o budování metra, vznikl tak návrh prvního úseku trasy C (značeno jako I. C). Metro jistě patří k jednomu z nepostradatelných dopravních prostředků moderního města. Na jeho výstavbě lze pozorovat zajímavý vývoj tunelářských postupů. Užívanou technologií ale také dovednosti využít nových progresivních a inovativních řešení. Technologii ovlivňují především komplikované pražské geologické poměry, které se vyznačují svojí pestrostí. Nejrozsáhlejší plochu zaujímají v Praze horniny ordoviku, které tvoří podklad městského centra. V kombinaci s vodonosnými vltavskými terasami vytváří podmínky, ve kterých je nutné užití sofistikovaných stavebních postupů a technických řešení.

Výstavba starších provozních úseků metra probíhala prstencovou metodou z litinových i železobetonových tybinků, nemechanizovaným ale i mechanizovaným štítováním. Od 90. let byla jednoznačně preferována NRTM. V roce 2000 byla použita moderní progresivní metoda pro podchod Vltavy a to kombinace vysouvání a plavení tzv. metoda vysouvání tunelů. Poslední trendy výstavby metra však kombinují využití NRTM, kterou si české podzemní stavitelství oblíbilo, s kontinuální ražbou plnoprofilových tunelovacích strojů ve formě štítů s možností kontroly tlaku na čelbě. Je to další stupeň vývoje pro posun velmi dobré úrovně našeho podzemního stavitelství. Doplnění cyklické ražby NRTM, technologií kontinuální ražby přináší její mnohostranné využití v obtížných podmínkách, v nichž je metoda NRTM nedostačující především z geomechanického pohledu.

Postupný vývoj díla stanice Nádraží Veleslavín naznačuje velice dlouhý proces hledání ideálních, funkčních a realizovatelných řešení a opatření vzhledem k zadání a aktuální geologické situaci. Pro moderní výstavbu ražených podzemních děl řešených především v intravilánu je stanice dalším milníkem vývoje postupů a dovedností při ražbě podzemních děl pražského metra. Výhodnou shledávám samotnou pozici stanice metra Nádraží Veleslavín, jejíž poloha a koncepce je propojena s plánovanou rekonstrukcí železniční trati Praha - Kladno a dodává tak Praze obslužnost SZ sektoru. Stanice svým umístěním umožní zkvalitnění dopravy na místní i regionální úrovni. Nachází se zde vhodné umístění

propojovacího vestibulu pro vlakové a autobusové spojení, městskou hromadnou dopravu a přístup na parkoviště osobních automobilů. Dispozičně je profil nástupiště navrhnuto na rozteč sloupů po 6m, prostor trojlodní stanice je tak otevřenější a působí vzdušně.

Před zahájením výstavby byl, z důvodu několikrát změněných geologických podmínek na trase, proveden doplňkový geologický průzkum. Stupeň prozkoumanosti horninového prostředí, vede především ke zkvalitnění prognózy a cílenému technicko-technologickému řešení procesu výstavby. Je to jistě jeden z důležitých faktorů ovlivňující ekonomicko-hospodářské zkvalitnění výstavby. Z důvodů důležitého a frekventovaného dopravního spojení (ul. Evropská), nacházejícího se nad prostorem ražené části stanice, a omezených prostorových možností staveniště (zástavba, železnice, frekventovaná silnice), byla zvolena spíše ražba oproti otevřené stavební jámě. Nejen dispozice staveniště si vyžádala kvalitní organizaci dopravy a následného zásobování ražby. Časové prodlevy počátku výstavby, kterým přecházely zdlouhavé legislativní procesy, a náročné přeložky inženýrských sítí, si vyžádaly ještě preciznější propracování odtěžování stavební jámy a sjízdné rampy, s kladeným důrazem na časovou efektivnost. Z důvodů komplikovaných geologických podmínek a nízkého nadloží nebylo možno aplikovat jednolodní profil, při jeho využití by nadloží nebylo schopno plnit svou funkci horninové klenby. Jedná se o první trojlodní stanici pražského metra raženou metodou NRTM. Stavba stanice, byla díky časovým ztrátám, které ohrožovaly pozastavení navazující technologie EPBS a prodražení výstavby na celé trase, zkrácena o technologickou část-72m na konečnou délku omezenou pouze na staniční část-100m. V rámci diskuzí bylo zvažováno několik alternativních řešení vedoucích k možnostem umístění technologické části. Nakonec bylo rozhodnuto, v zájmu dodržení časového harmonogramu trasy na úkor stanice, o rozšíření části hloubeného objektu. Dílo disponuje inovativními detaily a přístupy k řešení problematiky výstavby pražského metra, které lze jistě využít pro budoucí realizovaná díla

Staniční tunel je prezentován na modelové situaci průběhu výstavby. Ta je definována postupnou ražbou jednotlivých výrubů dělenou čelbou. Kalota je vždy zajištěna primárním ostěním a svorníky. Na čerpání pevnosti Obr 24 lze pozorovat uvolněnější plochy v oblasti zajištění svorníky, které potvrzují důležitost využití zajišťování nadloží při ražbě. V návaznosti na to, bych chtěla obecně vyzdvihnout důležitost operativního řešení během

výstavby. Kvalitním alternativním opatřením lze zefektivnit výstavbu jak po ekonomicko-hospodářské stránce tak předejít větším negativním následkům (kolapsům). Ty se mohou nepříznivě podepsat na prodražení celé výstavby. Modelová situace vykazuje největší plochy čerpání pevnosti v bocích a následně v místech paty sloupu - což je důsledek namáhání přístropí tunelů. Ukazuje to na nízkou pevnost horninového prostředí a správnost využití trojlodního profilu, kdy profil plní svojí funkci a využívá principů NRTM. Kombinace nových postupů a materiálů umožnila unikátní technické řešení. Jednalo se postupnou ražbu jednotlivých profilů, přechodové detaily, které byly kritickým místem, spárové plechy, pojistný injekční systém, stříkaná izolace jako nová progresivní metoda izolování podzemních staveb disponujících náročnou geometrií a detaily. Z dostupných informací z průběhu výstavby, bylo potřeba dodatečné injektáže přechodového detailu. Pojistný injekční systém lze tedy v tomto ohledu do budoucna více zefektivnit. Využití stříkané hydroizolace je jistě přínosné pro nabyté poznatky, kterých lze využít při další aplikaci. Náročné bylo provádění monolitických konstrukcí velkých dimenzí v podzemí, kde je nedostatek manipulačního prostoru v kombinaci se složitostí provázání výztuže a aplikace krystalizačních plechů. Byla zde také využita speciální bednicí forma s dvojitým čílkováním. Od dokončení ražby středové kaloty probíhala doprava a zásobování pouze vertikálním směrem. Při betonáži definitivní obezdívky ST, kdy probíhala výstavba hloubené části, bylo nutné provést demontáž bednicího a armovacího vozu v podzemí.

Stavba se jistě řadí mezi unikátní díla, které vytváří obraz kvalitní technické vyspělosti a ovládnutí dovedností a principů nejen metody NRTM na výstavbě metra, v průběhu let jejího používání v pražském prostředí. Dílo přispělo k obohacení technických řešení podzemních staveb o zmíněné detaily, ale také přístupu k organizaci výstavby, která byla klíčová pro navazující technologie EPBS strojů TBM využívané na traťových úsecích. Použití této technologie lze chápat jako obnovení ražby technologií TBM v ČR. Primárním vstupem do celého procesu však zůstává horninové prostředí, ovlivňující postup výstavby. Modelová situace znázorňuje působení daného prostředí na podzemní dílo použitím technologie NRTM

Seznam použité literatury:

- [1] *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2009, roč. 9, 5/2009. ISSN 12133116. Dostupné z: http://www.betontks.cz/casopis/BETON_TKS_2009-05.pdf
- [2] SOUKUP, Václav. *Edice Dokumenty českého tunelářského komitétu ITA/AITES: Svazek 2: Zásady a principy NRTM jako převažující metody konvenčního tunelování v ČR*. 1. vyd. Praha, 2006. Dostupné z: http://www.ita-aites.cz/files/edice_CTuK/ctuk_02.pdf
- [3] BARTÁK, Jiří, Pavel ŠOUREK a Jakub KARLÍČEK. *Podzemní stavitelství v České republice*. Praha: SATRA, 2007, 318 s. ISBN 978-80-239-8568-9.
- [4] KRÁSA, David a Jiří RŮŽIČKA. Příklady staveb realizovaných podle projektů Metroprojektu Praha, a.s. *Tunel: Časopis českého tunelářského komitétu a slovenskej tunelárskej asociace ITA/AITES*. 2006, roč. 15, 2/2006. Dostupné z: http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_2_06.pdf
- [5] CZTA. *Web české tunelářské asociace ITA AITES* [online]. Ministerstvo vnitra. Praha, 2014 [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: <http://www.ita-aites.cz/>
- [6] ALDORF, Josef. *Mechanika podzemních konstrukcí*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1999, 410 s. ISBN 80-707-8695-7.
- [7] KLEPSATEL, František. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, 2003, 215 s. ISBN 80-889-0543-5.
- [8] KLEPSATEL, František, Libor MAŘÍK a Miloslav FRANKOVSKÝ. *Městské podzemní stavby*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2005, 285 s. ISBN 80-807-6021-7.
- [9] SVOBODA, Tomáš. *Numerický model tunelu NRTM v tuhém jílu*. Praha, 2010. Doktorská disertační práce. Disertační práce. Univerzita Karlova v Praze.
- [10] BICAN, Petr, Petr CHAMRA, Václav DOHNÁLEK, Jan PANUŠKA a Linda VYDROVÁ. Stanice Veleslavín-první trojlodní stanice pražského metra navržená metodou NRTM. *Tunel: časopis českého tunelářského komitétu a slovenskej tunelárskej asociace ITA/AITES*. 2012, roč. 21, 1/2012. Dostupné z: http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_1_12.pdf

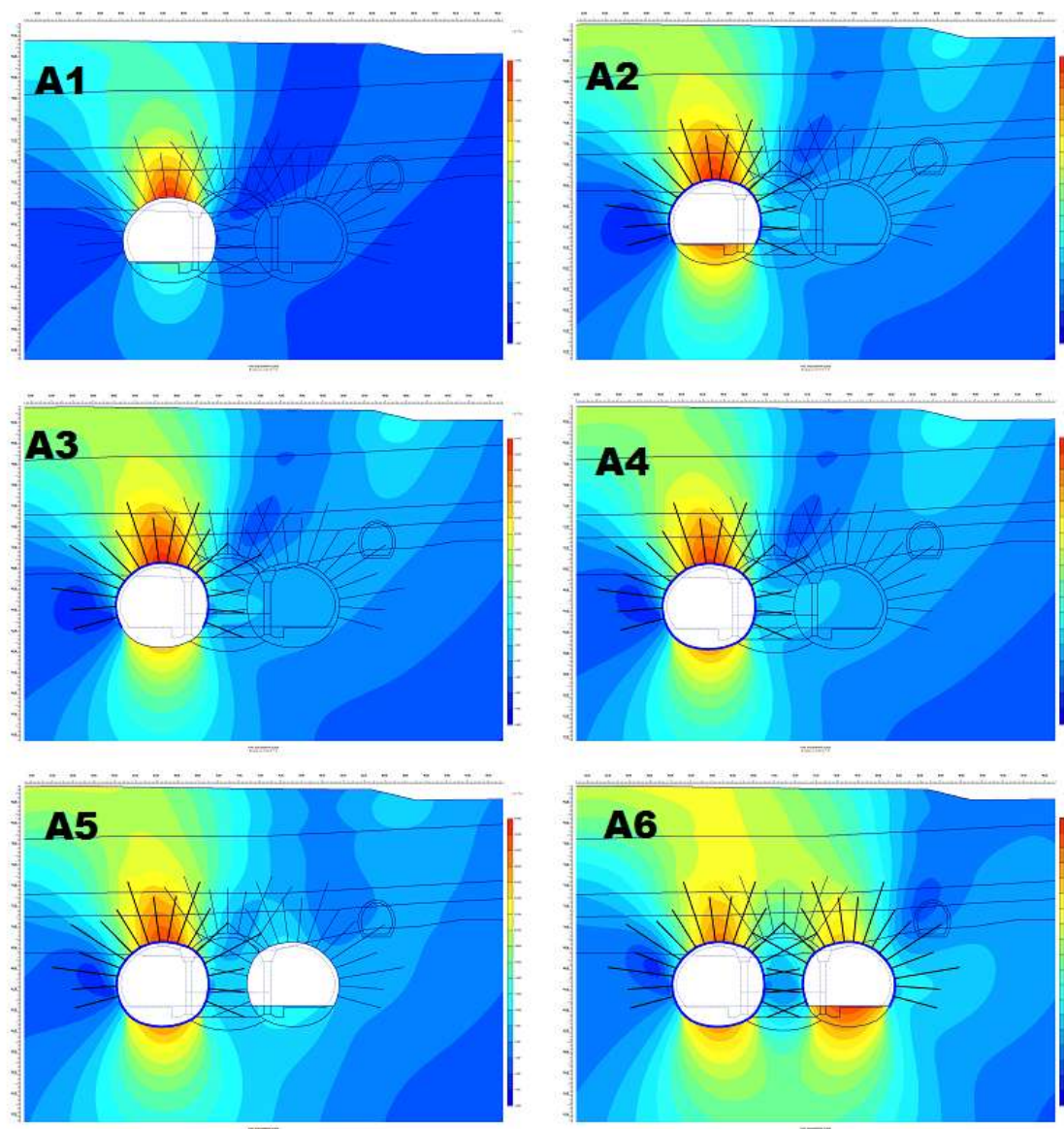
- [11]BOHÁTKOVÁ, Lucie. ARCADIS GEOTECHNIKA. *Závěrečná zpráva: doplňkového geotechnické průzkum pro stanici Veleslavín na trase V.A.* [Elektronický záznam PDF]. Praha, 2011, 229 s. [cit. 21.10.2011].
- [12]SDRUŽENÍ „Arcadis-Inset,„. *Komplexní hydrogeomonitoring a geomonitoring na stavbu metra V.A.* Praha, 2011.
- [13]BARTÁK, Jiří. *Podzemní stavby*. Praha, 2009. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2009/05/>
- [14] PANUŠKA, Jan, Miroslav CHYBA a Petr CHAMRA. Výstavba ražené části stanice metra Nádraží Veleslavín v rámci prodloužení trasy V.A v Praze. *Tunel: Časopis českého tunelářského komitetu a slovenskej tunelárskej asociace ITA/AITES*. 2013, roč. 22, 2/2013, s. 9. Dostupné z: <http://www.ita-aites.cz>
- [15] Metroprojekt Praha a.s.. *Projektová dokumentace: stupeň DPS*. Praha, 2012.
- [16]HARANT, David. *Nádraží Veleslavín*. Praha, 2013. Diplomová práce České vysoké učení technické.Fakulta stavební.katedra technologie staveb
- [17]HRUBEŠOVÁ, Eva, Lukáš ĎURIŠ a Josef ALDORF. ITA-AITES. *POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ S KLASICKÝMI TEORIEMI, CHYBY PŘI MODELOVÁNÍ*. Ostrava, 2014, 36 s. Dostupné z: http://www.ita-aites.cz/files/Seminare/2014_01_to/hrubesova-porovnani-vysledku-num-modelovani.pdf
- [18]PÍZA, Jan. SUBTERRA a.s. *Dopravní řád stavba Metro V.A stanice Veleslavín*. Praha, 2013.
- [19] ŠÍMA, Jaroslav, Ondřej KRČMÁŘ, Radovan MATZNER, Jan DVOŘÁK a Luboš CHÁMA. Stříkaná hydroizolační membrána Masterseal 345 jako úspěšné alternativní řešení. *Tunel: Časopis českého tunelářského komitetu a slovenskej tunelárskej asociace ITA/AITES*. 2011, roč. 20, 2/2011. Dostupné z: http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_2_11.pdf
- [20]ZÁMEČNÍK, Michal a Miroslav KOCHÁNEK. Zkušenosti s použitím stříkané hydroizolace Masterseal 345 v podzemních stavbách ČR. In: [online]. 3.konference Beton v podzemních a základových k-cí [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: http://www.basf-cc.cz/cs/novinky/prisadydobetonu/technologiepropodzemnistavby/Documents/zkusenosti_s_pouzitim_strikane_hydroizolace_masterseal_345.pdf

- [21] BASF STAVEBNÍ HMOTY ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o.. *Podzemní stavby: Masterseal 345*[online]. 2014 [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: <http://www.basf-cz.cz/cs/produkty/podzemnistavby/podzemnistavby/Pages/default.aspx>
- [22] PANUŠKA, Jan, Miroslav CHYBA a Linda VYDROVÁ. SUBTERRA a.s.;METROSTAV a.s..*Uzavřený hydroizolační systém realizovaný aplikací stříkané hydroizolační membrány-zkušenosti z realizace*. Praha, 2013.
- [23] VYDROVÁ, Linda. METROSTAV a.s. Divize 8. *Prague Metro Extension: Veleslavín Station – Sprayed Waterproofing Membrane*. Praha, 2012.
- [24] 12. MEZINÁRODNÍ KONFERENCE PODZEMNÍ STAVBY PRAHA 2013, 12.22 Alexandr Butovič ,. Praha:Česká tunelářská asociace ITA-AITES, 2013. ISBN 978-802-6038-672.
- [25] PRUŠKA, Jan. ČVUT. *Přednášky FSV ČVUT: NRTM*. Praha, 2014. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~Pruskjan/YVPZ%202014/NRTMx.pdf>
- [26] POKORNÝ, Jiří. METROPROJEKT Praha a.s. *Metroprojekt informuje*. ročník 2. Praha, 2009. Dostupné z: http://www.metroprojekt.cz/files/casopis/metroprojekt_02_2009.pdf

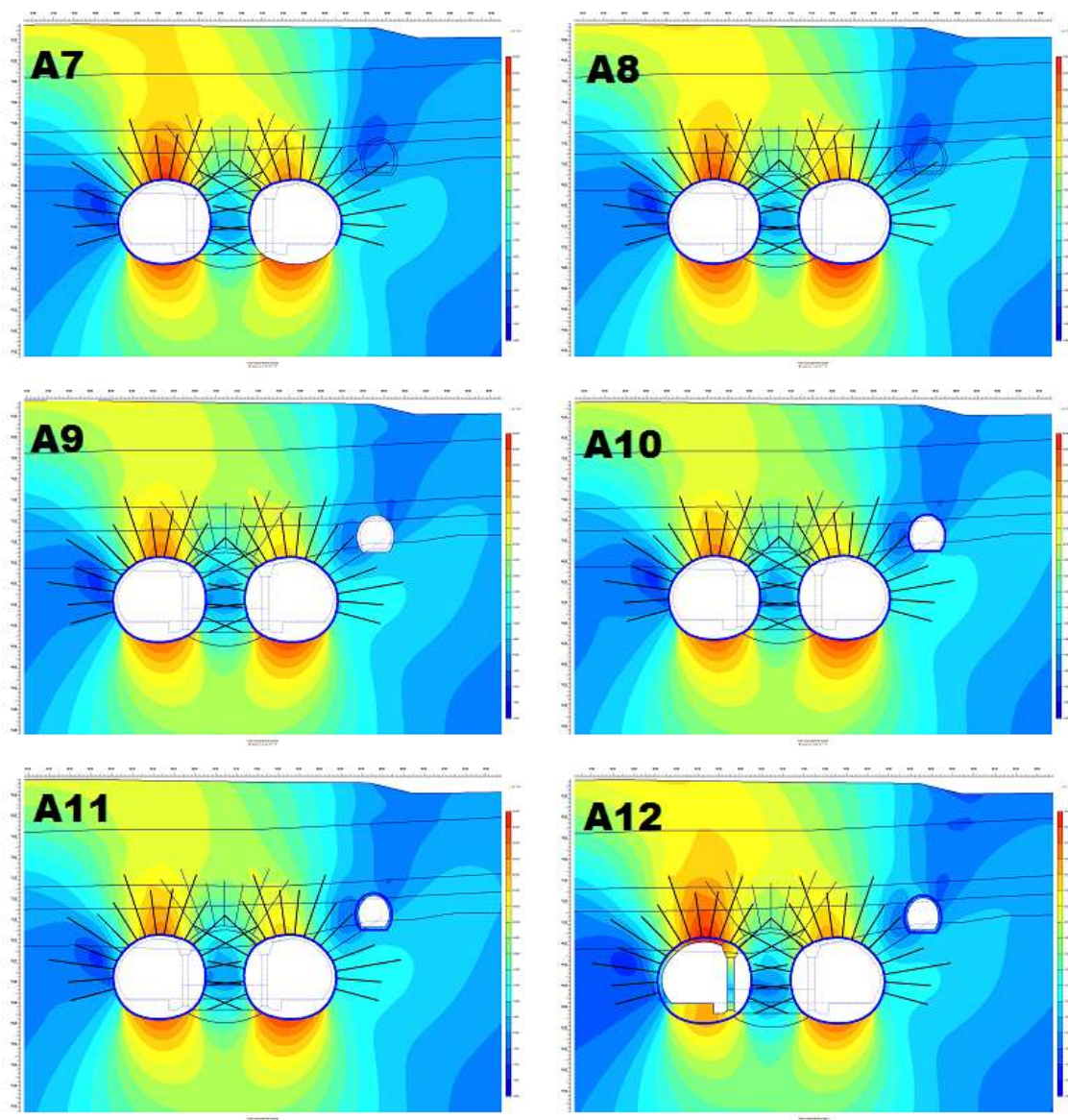
Přílohová část

Seznam příloh:

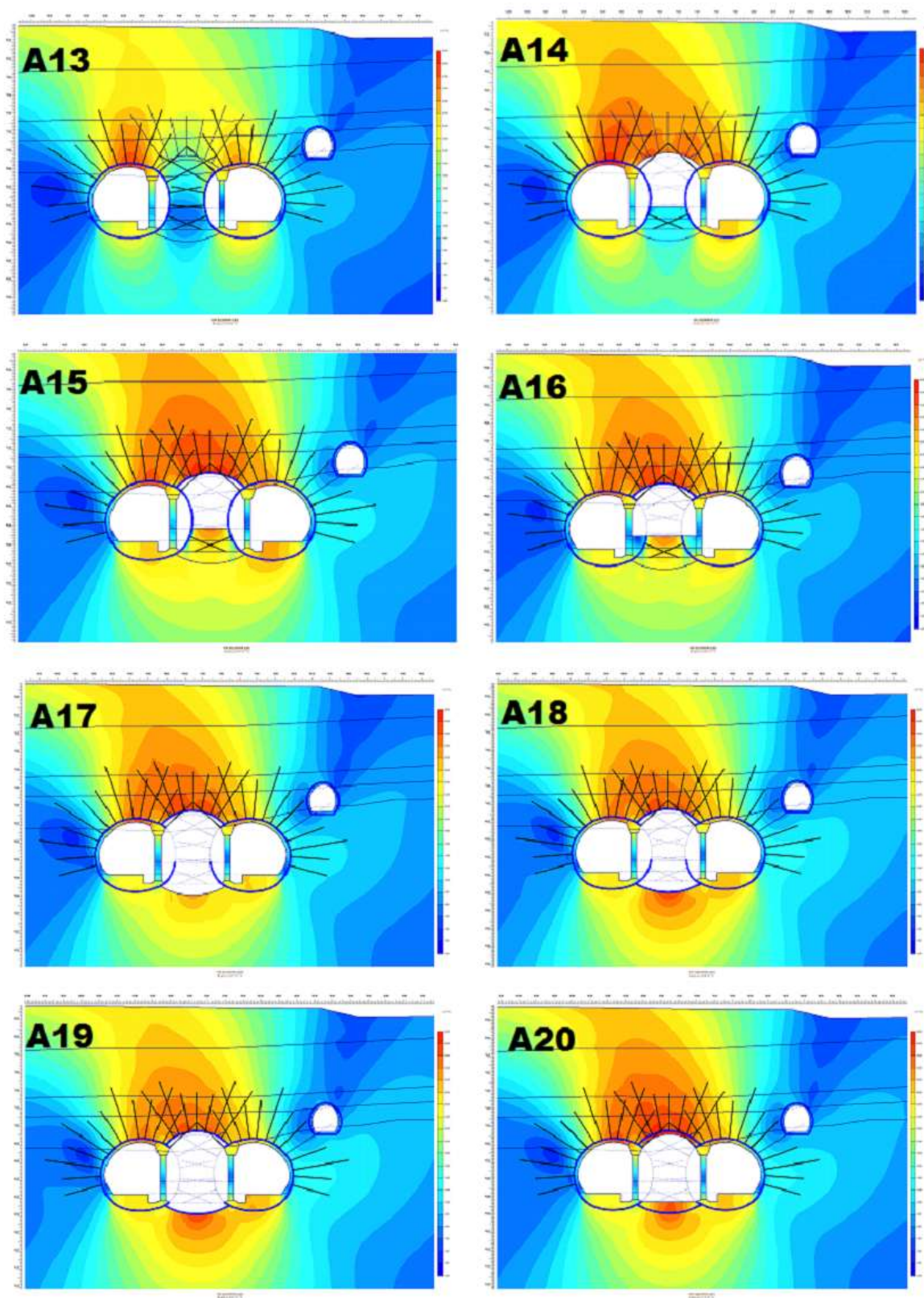
- Příloha č. 1. Maximální totální deformace(**A:** Utot, Fáze:**1-6**)
- Příloha č. 2. Maximální totální deformace(**A:** Utot, Fáze:**7-12**)
- Příloha č. 3. Maximální totální deformace(**A:**Utot, Fáze:**13-20**)
- Příloha č. 4. Maximální vertikální deformace(**B:** Uy, Fáze:**1-6**)
- Příloha č. 5. Maximální vertikální deformace(**B:** Uy, Fáze:**7-12**)
- Příloha č. 6. Maximální vertikální deformace(**B:** Uy, Fáze:**13-20**)
- Příloha č. 7. Čerpání pevnosti(**C:** RSS, Fáze:**1-6**)
- Příloha č. 8. Čerpání pevnosti(**C:** Uy, Fáze:**13-20**)
- Příloha č. 9. Čerpání pevnosti(**C:** Vertikální deformace, Fáze:**13-20**)
- Příloha č. 10. Tabulka hodnot k uvedeným výstupům, Fáze:**13-20**)
- Příloha č. 11. Napojení primárního ostění na střední staniční tunel-napojení na kalotu
- Příloha č. 12. Napojení primárního ostění na střední staniční tunel-napojení na dno
- Příloha č. 13. Detail napojení ostění s definitivním ostěním středního tunelu
- Příloha č. 14. Dopravní řád povrch
- Příloha č. 15. Dopravní řád podzemí

Fáze:1-6.

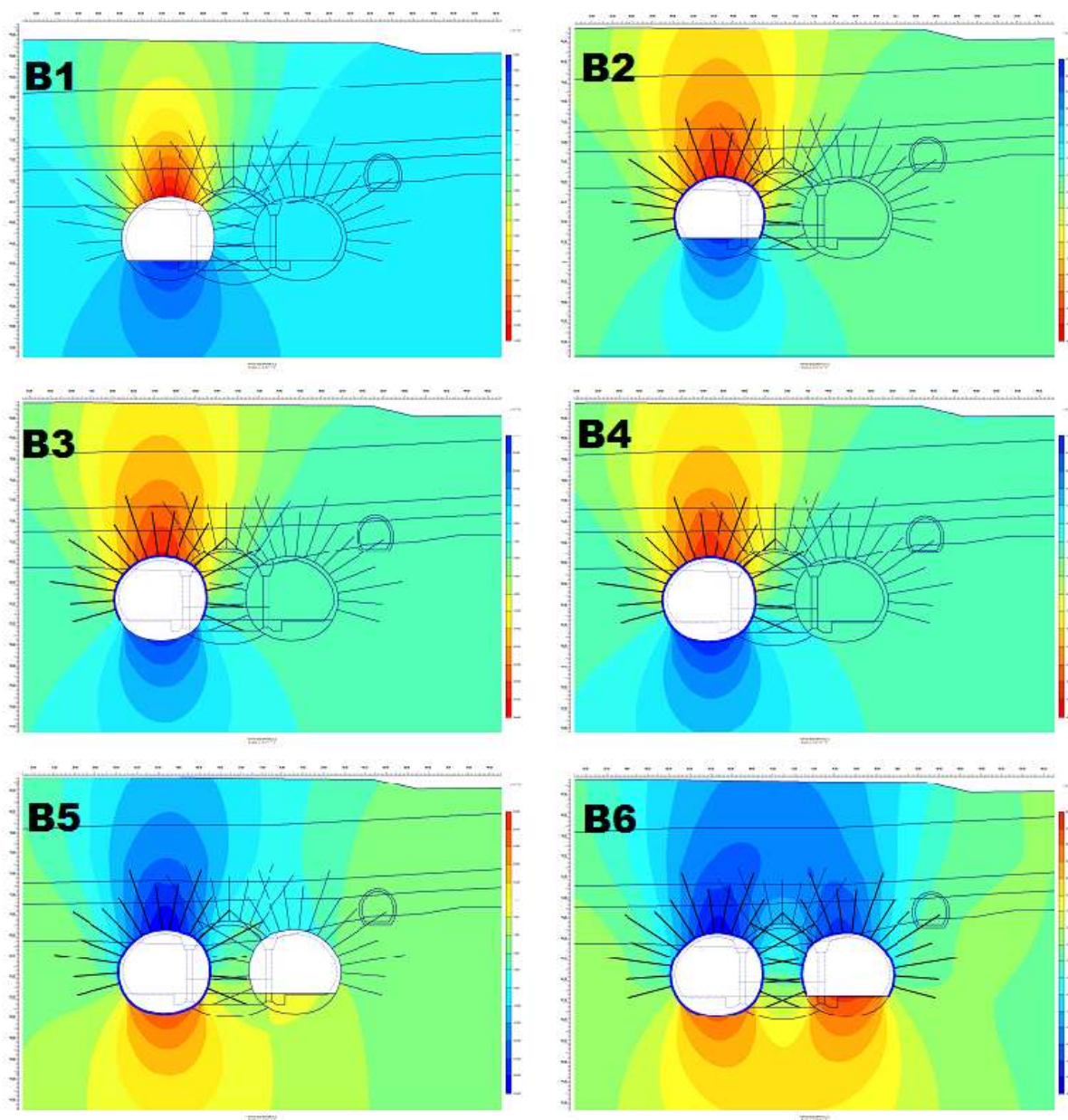
Příloha č.1. Maximální totální deformace(A: Utot, Fáze:1-6)

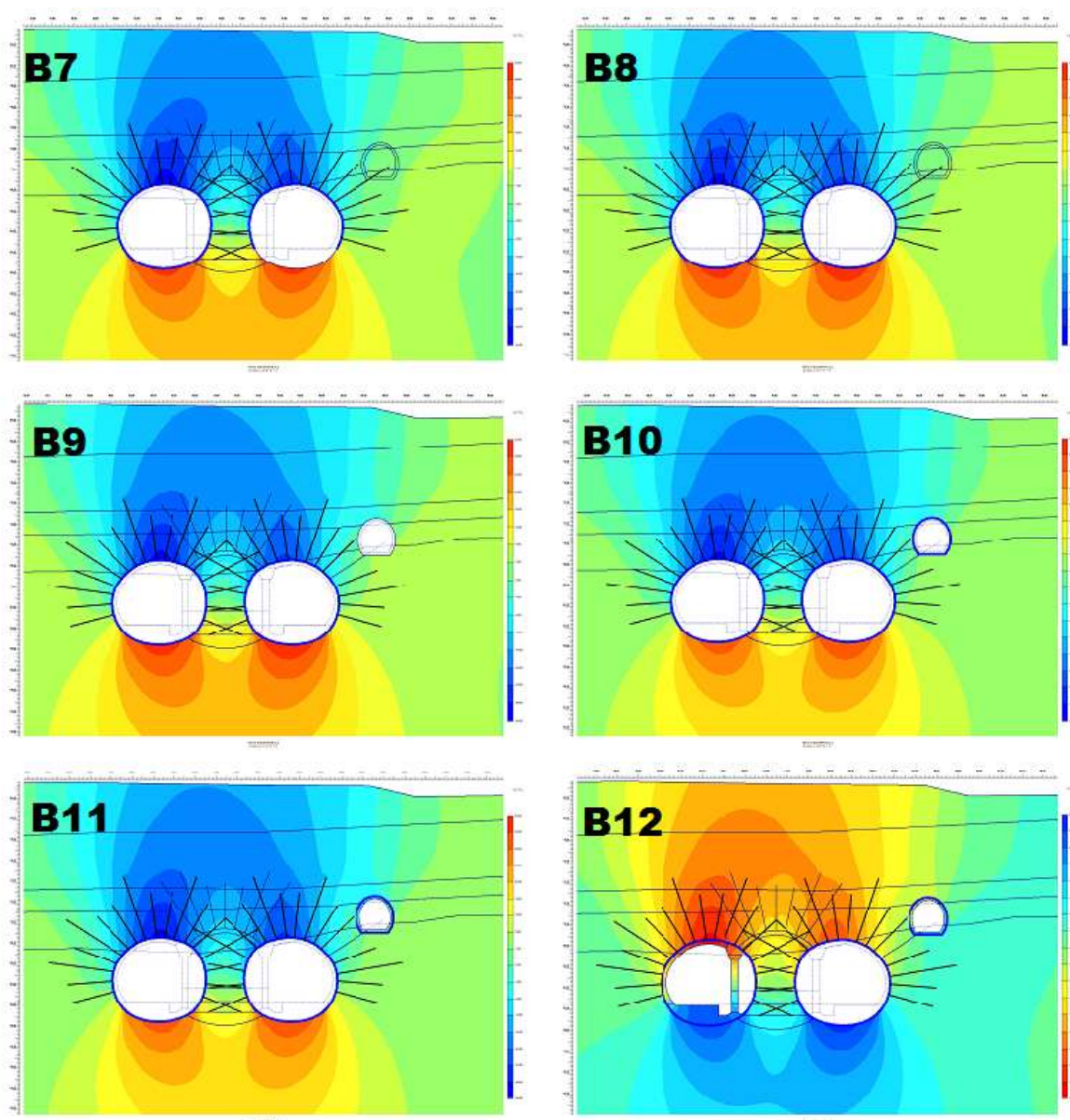
Fáze:7-12.Příloha č.2. Maximální totální deformace(**A**: Utot, Fáze:7-12)

Fáze:13-20

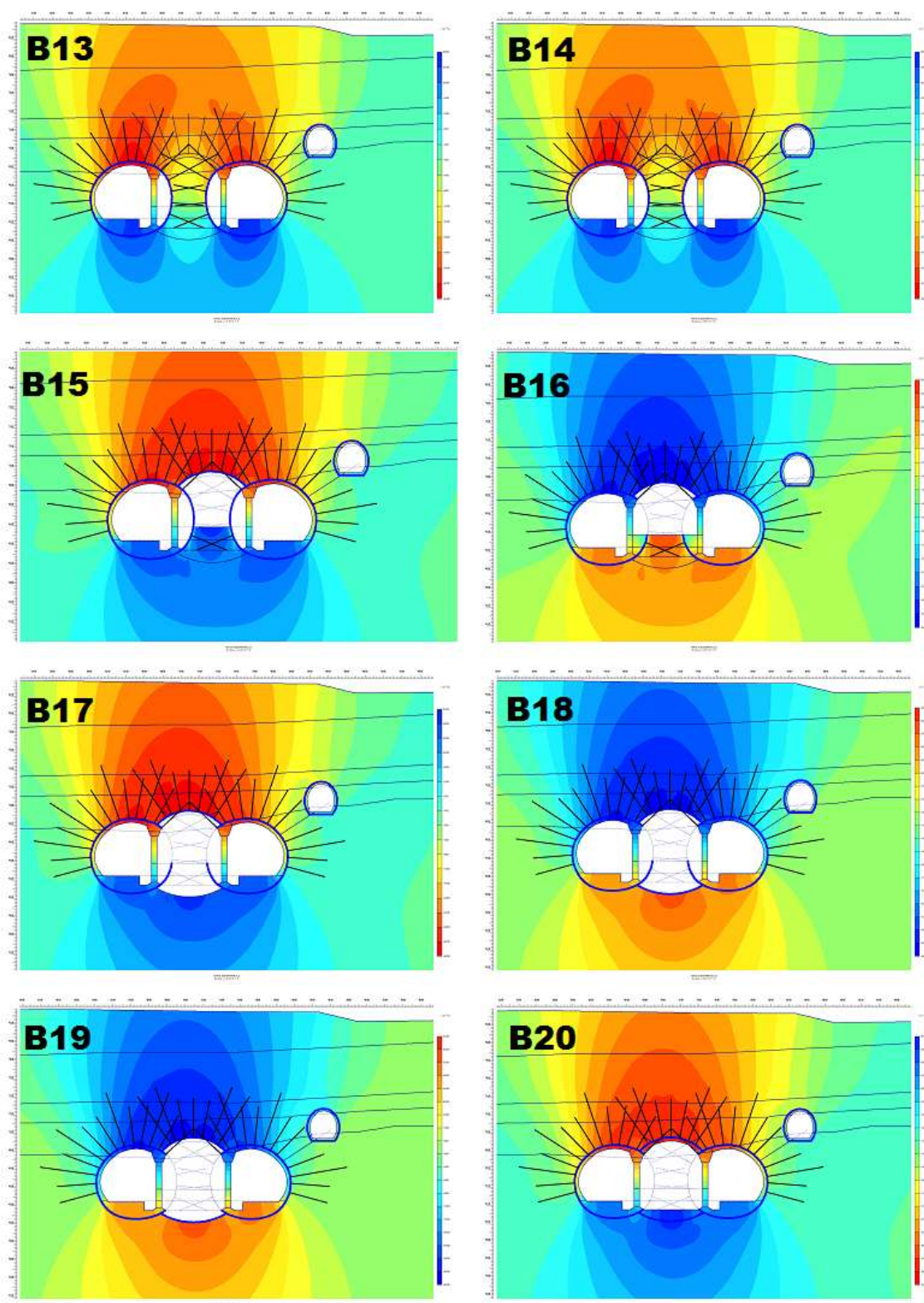


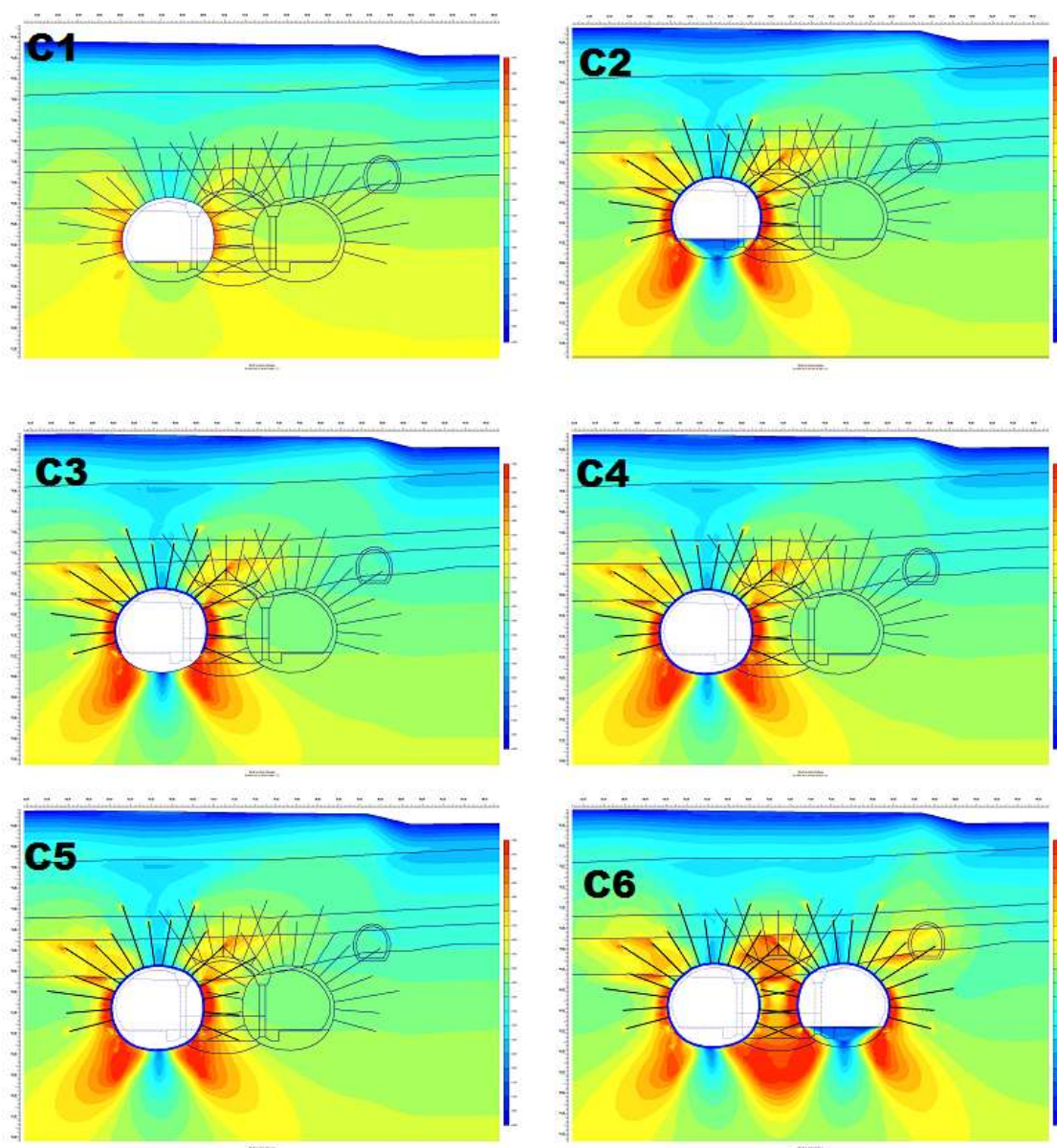
Příloha č.3. Maximální totální deformace(A:Utot, Fáze:13-20)

Fáze:1-6Příloha č.4. Maximální vertikální deformace(**B:** U_y , Fáze:1-6)

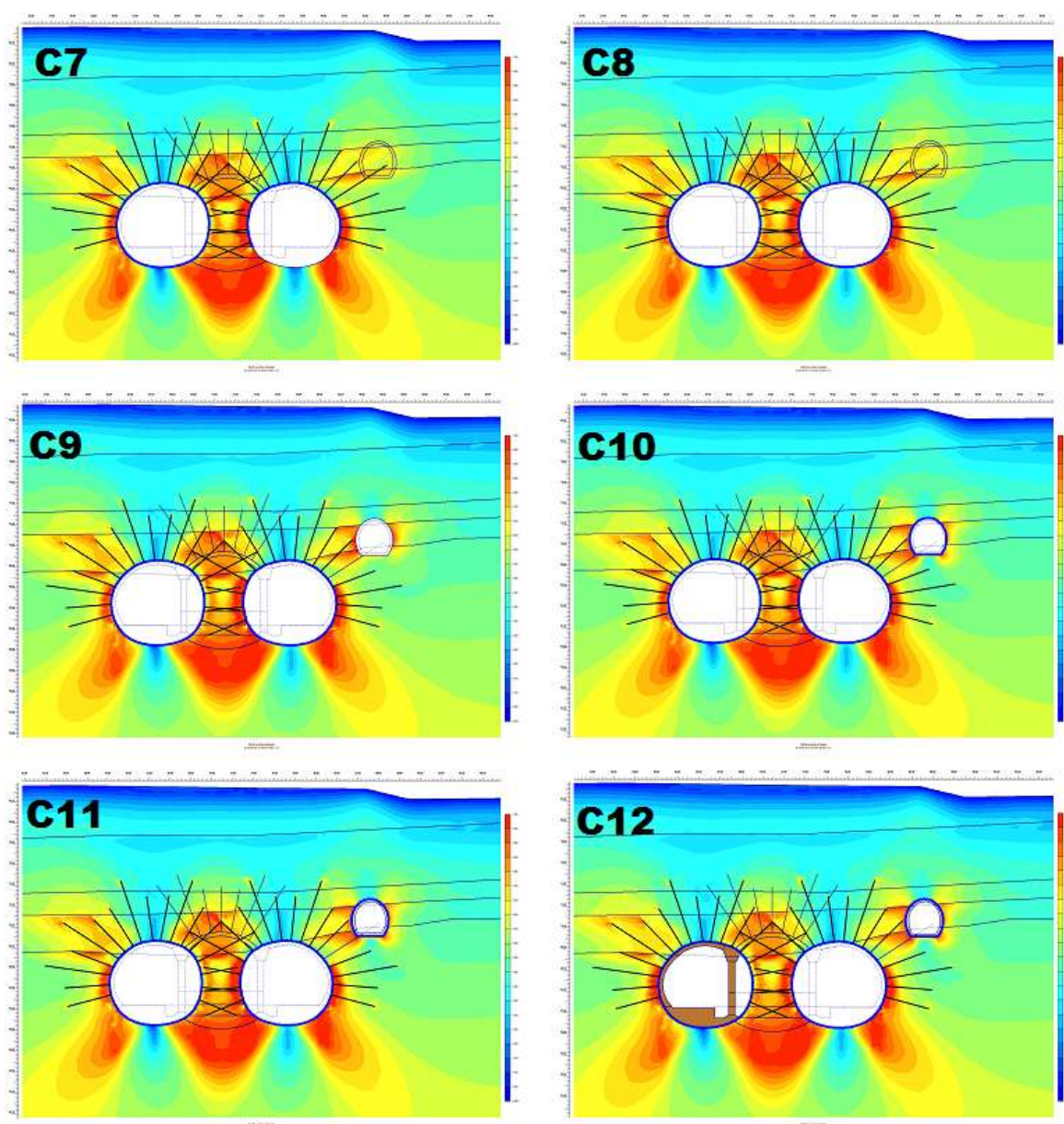
Fáze:7-12Příloha č.5. Maximální vertikální deformace(**B**: U_y , Fáze:7-12)

Fáze:13-20

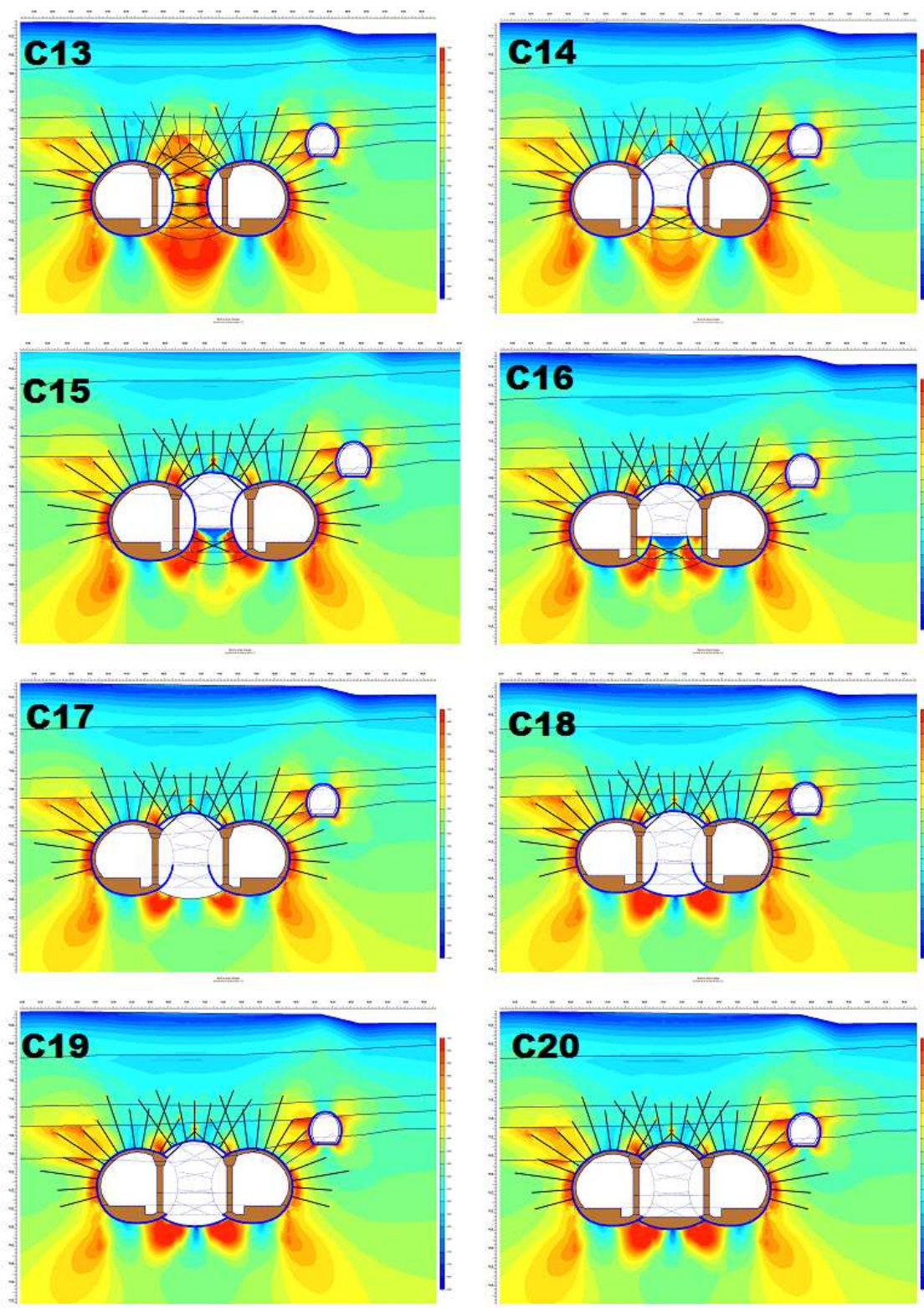
Příloha č.6. Maximální vertikální deformace(**B**: Uy, Fáze:13-20)

Fáze:1-6.

Příloha č.7. Čerpání pevnosti(C: RSS, Fáze:1-6)

Fáze:7-12

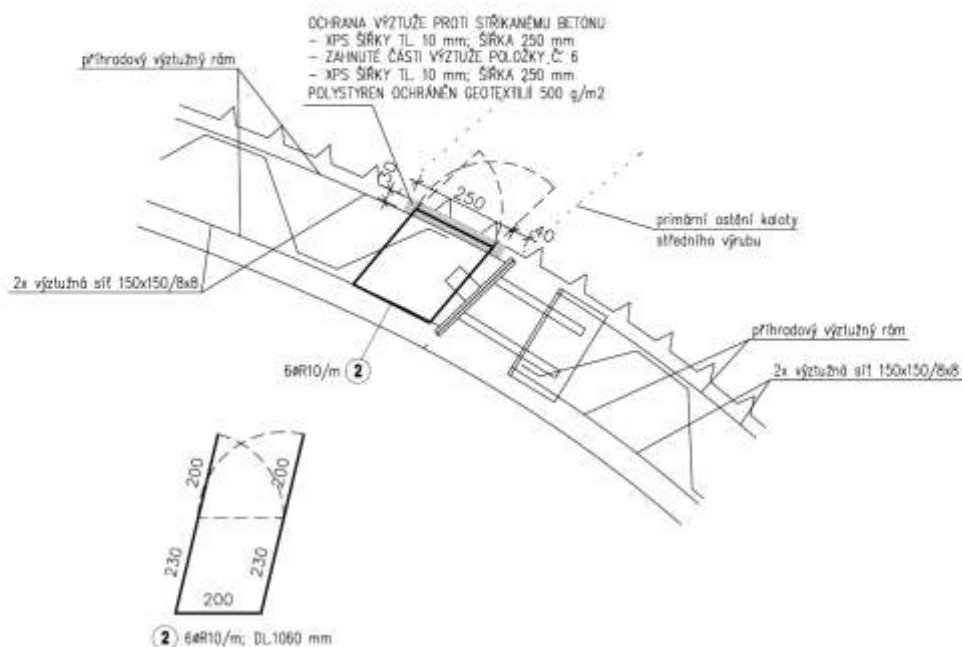
Fáze:13-20



Příloha č.9. Čerpání pevnosti(C: Vertikální deformace, Fáze:13-20)

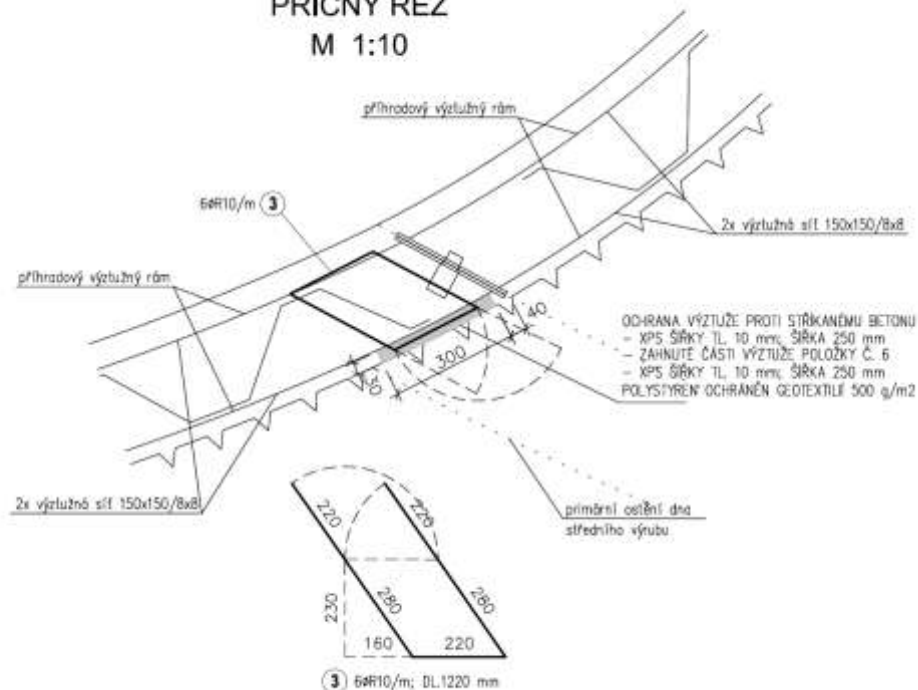
Fáze	koncový krok výpočtu	A U_{tot}	B U_y	C RSS	M_{stage}
1	2	12,97	-12,89	0,87	0,2
2	21	33,77	-33,12	1	1
3	24	33,82	-33,17	1	0,2
4	26	32,88	-32,21	1	1
5	28	32,62	-31,9	1	0,2
6	48	34,04	-33,55	1	1
7	51	31,23	-30,66	1	0,2
8	53	31,95	-31,51	1	1
9	55	32,24	-31,79	1	0,2
10	57	32,92	-32,5	1	1
11	59	32,5	-32,07	1	1
12	61	33,79	-33,34	1	1
13	64	36,05	-35,53	1	1
14	74	35,23	-34,64	1	0,4
15	90	35,53	-34,84	1	1
16	97	36,56	-35,74	1	1
17	99	36,72	-35,34	1	0,4
18	101	36,03	-35,34	1	1
19	103	36,45	-36,33	1	1
20	105	37,13	-36,21	1	1

NAPOJENÍ PRIMÁRNÍHO OSTĚNÍ NA STŘEDNÍ TUNEL
STANIČNÍ TUNEL - NAPOJENÍ NA KALOTU
PŘÍČNÝ ŘEZ
M 1:10

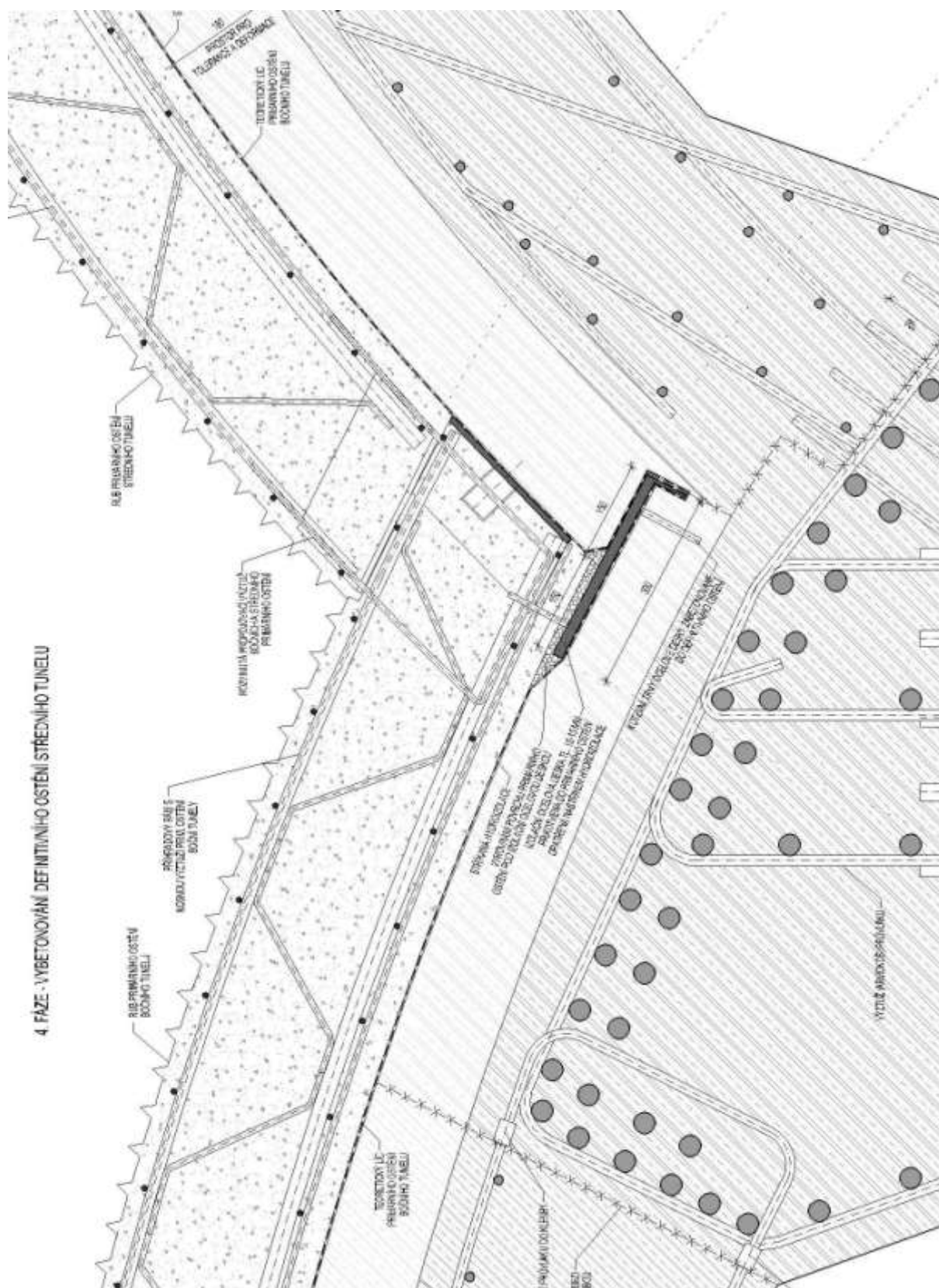


Příloha č.11. Napojení primárního ostění na střední staniční tunel-napojení na kalotu

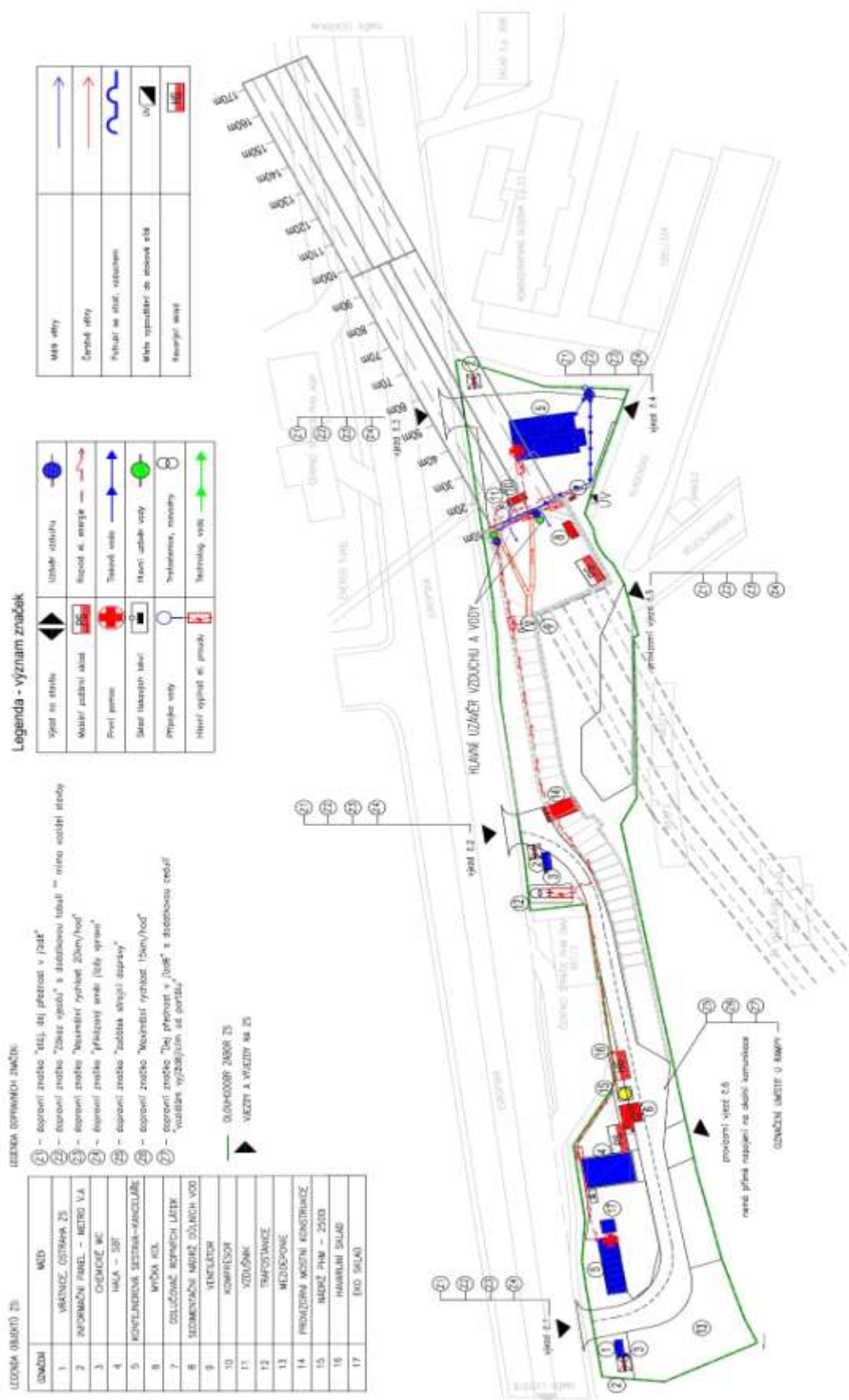
NAPOJENÍ PRIMÁRNÍHO OSTĚNÍ NA STŘEDNÍ TUNEL
STANIČNÍ TUNEL - NAPOJENÍ NA DNO
PŘÍČNÝ ŘEZ
M 1:10



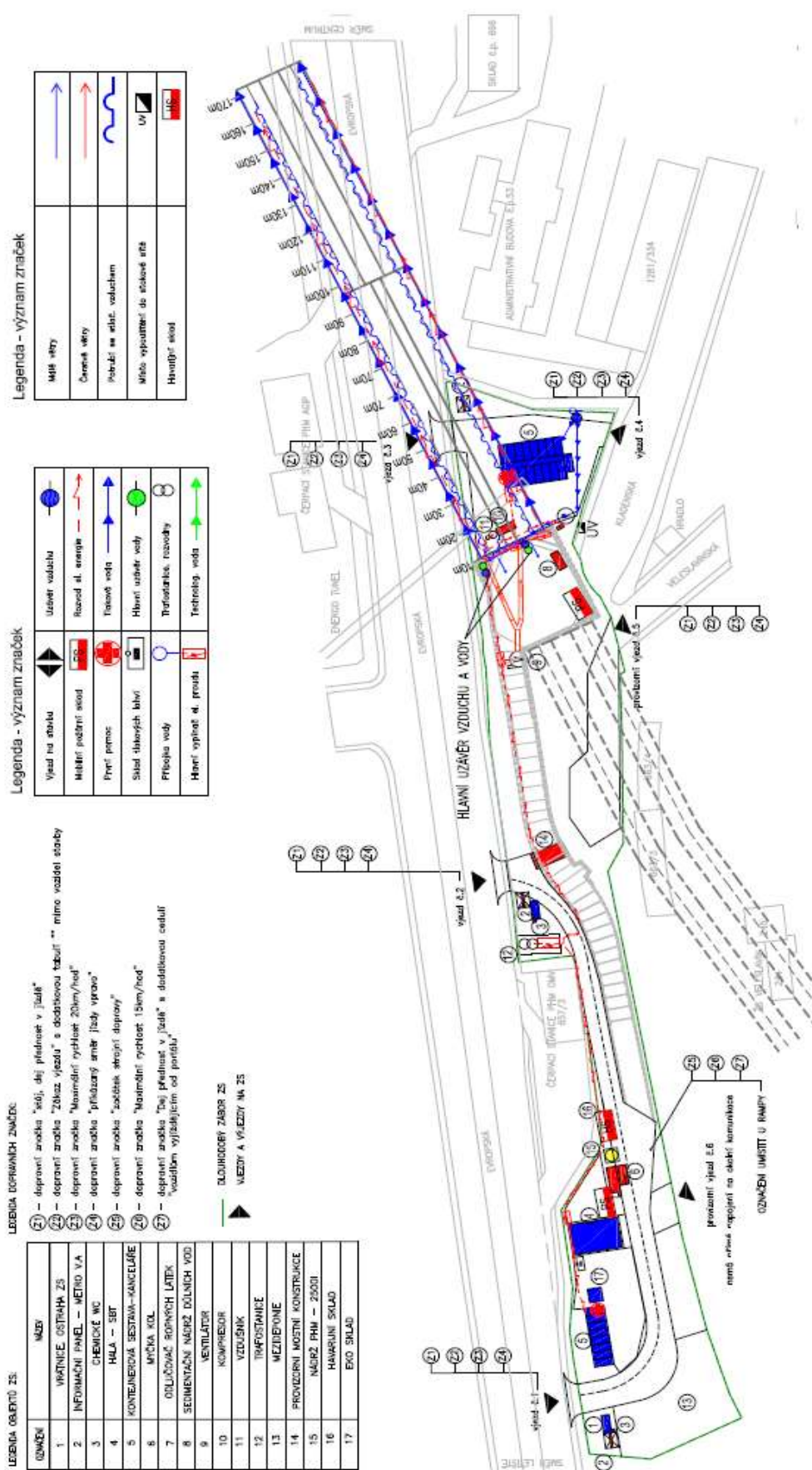
Příloha č. 12. Napojení primárního ostění na střední staniční tunel-napojení na dno, zdroj: [15]



Příloha č. 13. Detail napojení ostění s definitivním ostěním středního tunelu, zdroj: [15]



Příloha č. 14. Dopravní řád povrch, zdroj: [18]



Příloha č. 15. Dopravní řád podzemí, zdroj: [18]

